89HN00116

SPÉCIFICATION D'ENTREPRISE

Janvier 1984 **H 115**

Principes de conception et de réalisation des mises à la terre

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE /CENTRE DE NORMALISATION

© 1984 - EDF

PAGE BLANCHE

Le présent rapport a pour objet de présenter les principes de conception et de réalisation des mises à la terre.

Il a été rédigé par les membres du Groupe de Travail « TERRE » de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

Ont participé à ce travail :

Messieurs	BONNARD	Service Etudes de Réseaux
	CHAMPIOT	Service Ensembles de Production
	GERARD	Service Etudes de Réseaux
	JOHANNET	Service Matériel Electrique
	KOUTEYNIKOFF	Service Matériel Electrique
	MENDES	Service Normalisation et Brevets Secrétaire du Groupe de Travail
	MEYNAUD	Service Etudes de Réseaux
	NAVATTE	ex Service Etudes de Réseaux Direction de la Distribution Centre de Distribution de Valenciennes

© 1984. EDF - SERVICE NORMALISATION 1, av. du Gl de Gaulle - 92140 CLAMART, (FRANCE)

TOUS DROITS DE REPRODUCTION RÉSERVÉS. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit préalable de l'éditeur.

NI	H 115
Janvier 1984	• Production et Transport • Equipement • Etudes et Recherches • Distribution • EDF International • Affaires Générales

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE — DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES

principes de conception et de réalisation des mises à la terre

H 115

PRINCIPES DE CONCEPTION ET DE REALISATION DES MISES A LA TERRE

Cette Note est destinée à fournir les éléments de réflexion à toute personne qui se trouve confrontée à des problèmes de conception, de réalisation ou de contrôle d'un réseau de terre.

La philosophie exprimée dans ces lignes s'est largement inspirée des résultats des études et des travaux effectués en France par P.G. LAURENT et G. BODIER, ainsi que de nombreux documents français et étrangers dont on trouvera la liste en bibliographie.

La mise à la terre dans les réseaux électriques paraît être relativement simple et cependant elle n'a cessé de présenter des difficultés ; les progrès récents accomplis tant en électrotechnique qu'en électronique de puissance ont fait apparaître de nouveaux problèmes, encore non parfaitement résolus, dus à la coexistence d'équipements électroniques sensibles avec des installations susceptibles de produire des courants de court-circuit de plusieurs dizaines de kiloampères.

Le réseau de terre d'une installation électrique doit assumer simultanément plusieurs fonctions : écouler dans le sol les courants de défaut et de foudre, assurer à tout moment le maintien de la sécurité des personnes et des biens et maintenir un potentiel de référence ; la notion de l'équipotentialité est la première caractéristique recherchée de l'ensemble du réseau et du circuit de terre.

L'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol autour du réseau de terre. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité : la conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol.

Avant de présenter et d'analyser plusieurs méthodes de mesure de la résistivité du sol, quelques lignes sont consacrées au rappel des principales définitions et de la théorie.

Un chapitre est consacré à une présentation succincte des méthodes de calcul et de mesure de la résistance d'un réseau de terre : malgré leur imprécision, ces méthodes ont montré leur grand intérêt lors de l'établissement de projet de réalisation de réseaux de terre d'installations étendues (centrales, grands postes).

Le comportement des terres en régime transitoire fait l'objet d'un chapitre particulier où l'on présente des résultats récents qui ont permis des progrès dans la réalisation de terre de pylônes THT.

Les tensions de pas et toucher qui constituent des critères de sécurité et de qualité des réseaux de terre sont traitées en un chapitre qui résume les connaissances actuelles.

Dans le dernier chapitre, quelques exemples illustrent la mise en oeuvre des principes énoncés pour l'établissement de projets de réseaux et de prises de terre.

Les modalités pratiques de réalisation seront traitées dans des documents d'application propres à chaque Direction opérationnelle.

Le Directeur des Etudes et Recherches,

Claude BIENVENU

H 115

SOMMAIRE

Pages

1. GENERALITES - RAPPELS THEORIQUES 7

1.1. Définition d'un réseau de terre 7

1.2. Fonctions des réseaux de terre 7
1.2.1. La sécurité des personnes et des animaux 7
1.2.2. Protection des installations de puissance 7
1.2.3. Protection des équipements fonctionnant à bas niveaux 7
1.2.4. Potentiel de référence 8

1.3. Etude géologique du sol 8

1.4. Répartition des potentiels autour d'un réseau de terre 9
1.4.1. Répartition des potentiels avec retour du courant à l'infini 9
1.4.2. Retour du courant par un autre réseau de terre 11
1.4.3. Déformation des surfaces équipotentielles dans un sol hétérogène 13

1.5. Interactions entre réseaux de terre 14

Bibliographie 14

2. RESISTIVITE DES SOLS 15

2.1. Introduction 15

2.2. Méthodes de mesure de la résistivité 15

2.3. Méthode des quatre électrodes 15
2.3.1. Principe de mesure 15
2.3.2. Méthode de Wenner 17
2.3.3. Notion de profondeur d'investigation 17
2.3.4. Choix de la profondeur d'investigation 18
2.3.5. Difficultés inhérentes aux mesures de résistivité 19
2.3.6. Interprétation des résultats 20

Bibliographie 21

3. CALCUL ET MESURE DE LA RESISTANCE D'UN RESEAU DE TERRE 22

3.1. Méthodes de calcul analytiques 22

3.2. Méthodes de calcul numériques 22
3.2.1. Besoins et applications typiques 22
3.2.2. Principes généraux 22

3.3. Principes des méthodes de mesure de la résistance d'un réseau de terre 23
3.3.1. Essai avec une terre connue 23
3.3.2. Méthode des trois points 24
3.3.3. Méthode de la « Chute de Potentiel » 24
3.3.3.1. Principes 24
3.3.3.2. Conditions de mesure 25

3.4. Mesure de la résistance d'une prise de terre ponctuelle 26
3.4.1. Principe de la mesure par tellurohmmètre 26
3.4.2. Modalités pratiques 26

3.5. Mesure de la résistance d'un réseau de terre étendu 27
3.5.1. Généralités 27
3.5.2. Emploi du tellurohmmètre 27
3.5.3. Méthodes par injection de courant 27
3.5.4. Méthode à la fréquence du réseau 28
3.5.5. Méthode par battements de fréquence 28
3.5.6. Fréquence de courant d'injection nettement différente de la fréquence du réseau 28
3.5.7. Guide de mesure et précautions à prendre 28
Annexe 29
Formulaire de résistances de terre 30

Bibliographie 31

4. COMPORTEMENT DES PRISES DE TERRE EN REGIME TRANSITOIRE 32

4.1. Introduction - Particularités du comportement des prises de terre en régime transitoire 32
4.1.1. Les courants transitoires 32
4.1.2. Constatations expérimentales 32

4.2. Comportement d'une prise de terre en fonction de la fréquence 32
4.2.1. Rappels sur la décomposition harmonique d'un signal transitoire 32
4.2.2. Effets inductifs dans les conducteurs de terre 33
4.2.3. Caractérisation d'une prise de terre en hautes fréquences : notion d'impédance harmonique 33
4.2.4. Cas d'un câble enterré horizontalement 34
4.2.5. Autres phénomènes apparaissant en hautes fréquences 35

4.3. Comportement d'une prise de terre en fonction du courant 36
4.3.1. Champ électrique dans le sol 36
4.3.2. Phénomènes de claquage dans le sol 36
4.3.3. Caractérisation du comportement des prises de terre 36
4.3.4. Résultats expérimentaux 36

4.4. Applications 38

Bibliographie 39

5. ELEMENTS D'INFORMATION CONCERNANT LES TENSIONS DE PAS ET DE CONTACT (TOUCHER) 40

5.1 Définitions 40

5.2. Effets du courant sur le corps humain 41

5.3. Résistance du trajet électrique 43
5.3.1. Résistance du corps humain 44
5.3.2. Résistance présentée par les chaussures 45
5.3.3. Résistance de terre des pieds 45

5.4. Calcul du courant dérivé 45
5.4.1. Tension de pas 45
5.4.2. Tension de contact 46

Bibliographie 46

6. APPLICATION - NOTIONS SUR LA CONCEPTION ET LA REALISATION DES RESEAUX DE TERRE 47

6.1. Objectifs de la conception des réseaux de terre 47

6.2. Conception et réalisation pratique des réseaux de terre des postes et centrales 47
6.2.1. Objectifs et contraintes à respecter 47
6.2.2. Adaptation des réseaux de terre aux types de terrain 48
6.2.3. Tracé du réseau de terre 48
6.2.4. Choix des matériels 49
6.2.5. Procédés de raccordement des éléments enterrés des réseaux de terre 51

6.3. Mise à la terre des équipements électroniques et des câbles de liaison 52
6.3.1. Principes généraux 52
6.3.2. Bâtis, châssis et enveloppe métalliques 52
6.3.3. Mise à la terre de l'alimentation alternative 53
6.3.4. Référence de potentiel des circuits électroniques (Masse électronique) 53
6.3.5. Procédés de mise à la terre des écrans des câbles 53
6.3.5.1. Introduction 53
6.3.5.2. Mise à la terre aux deux extrémités 55
6.3.5.3. Mise à la terre à une seule extrémité 55

6.4. Suggestion pour la réalisation pratique des prises de terre de réseaux aériens de distribution MT et BT 57
6.4.1. Postes MT/BT sur poteau et interrupteurs aériens 57
6.4.2. Mise à la terre des installations de la clientèle 58
6.4.3. Mise à la terre de bâtiments abritant des animaux 60

1. GENERALITES - RAPPELS THEORIQUES

1.1. DEFINITION D'UN RESEAU DE TERRE

- Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux.

Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie souvent l'expression « prise de terre », en réservant le terme « réseau de terre » aux installations importantes telles que postes et centrales. Dans ce 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.

1.2. FONCTIONS DES RESEAUX DE TERRE

Le rôle du réseau de terre d'une installation électrique est de permettre l'écoulement à l'intérieur du sol de courants de toutes origines, qu'il s'agisse, par exemple, de courants de choc dus à des coups de foudre ou bien de courants de défaut à 50 Hz.

Lors de l'écoulement de tels courants par une prise ou un réseau de terre, des différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, par exemple entre la prise de terre et le sol qui l'entoure, ou entre deux points du sol. La conception des prises et réseaux de terre doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien de :

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

1.2.1. La sécurité des personnes et des animaux

Lors de l'écoulement dans le sol de courants élevés, 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 le cas d'une installation, la situation idéale dont on doit chercher à se rapprocher est l'équipotentialité de l'ensemble du réseau et du circuit de terre.

1.2.2. 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 surtensions provoquées par les défauts à 50 Hz, les manoeuvres 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 (défauts 50 Hz) que pour les phénomènes rapides tels que ceux engendrés par la foudre.

1.2.3. Protection des équipements fonctionnant à bas niveaux

A côté des installations de puissance, on trouve souvent des équipements fonctionnant à des niveaux comparativement beaucoup plus bas : équipements de relayage dans les postes par exemple, mais aussi câbles P.T.T. installés à proximité des lignes, des postes ou des centrales. Ces équipements sont également exposés aux effets des surtensions subies par les installations de puissance, avec lesquelles ils peuvent être liés par couplage résistif (ou galvanique), 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 de paramètres qui dépendent notamment de la disposition des conducteurs de terre, de celle des équipements sensibles, des règles de mise à la terre de ces derniers, etc...

1.2.4. **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 mentionnées plus haut.

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 défaut peuvent alors atteindre des valeurs importantes.

Ces deux exemples montrent à nouveau l'importance de la résistance de terre et de la qualité de « l'équipotentialité » des réseaux de terre.

1.3. **ETUDE GEOLOGIQUE 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 débuter par une étude de la nature du sol sur lequel il sera réalisé.

L'étude de la nature et de la structure géologique d'un terrain par l'étude de la variation de sa résistivité suivant la profondeur peut paraître une notion toute théorique, bonne à discussions de géophysiciens ; il n'en est rien.

Si la connaissance du profil de la résistivité apparente d'un terrain est suffisante pour calculer la résistance d'une prise de terre ponctuelle, il n'en est pas de même en ce qui concerne celle d'un maillage étendu d'un poste source HT/MT, par exemple.

La connaissance de la résistivité réelle aux diverses profondeurs est l'une des bases nécessaires pour déterminer la configuration d'un réseau maillé de grande surface. En effet, si la présence de filons très résistants ou très conducteurs influence peu la résistivité apparente du terrain, elle fait varier notablement la résistance du réseau de terre établi en surface par la déformation des filets de courant qu'elle provoque.

La résistance d'un réseau de terre est proportionnelle à la résistivité du sol et du sous-sol dans lequel il 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 varier de quelques dizaines d'ohms mètres pour des terrains gras et humides à une dizaine de milliers d'ohms mètres pour des granits très sains et très secs ;
- le sol, à un endroit donné, est souvent hétérogène, aussi bien horizontalement que verticalement ;
- la résistivité des couches superficielles d'un terrain présente des variations saisonnières sous l'effet du gel et de la sécheresse (qui l'augmentent) ou de l'humidité (qui la diminue). Cette action peut se faire sentir jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres dans des conditions climatiques extrêmes et prolongées.

Il est donc prudent de tenir compte de ces variations de résistivité dans l'établissement d'un réseau de terre enfoui à une profondeur de l'ordre du mètre.

Les résistivités du sol en surface ou en profondeur sont rarement connues avant l'établissement des ouvrages et c'est souvent la réalisation des réseaux de terre eux-mêmes qui donne les premières indications sur la qualité des terrains. En toute logique, c'est le processus inverse qui devrait être de règle.

La conductibilité du sol est de nature essentiellement électrolytique ; elle est donc très faible à l'état sec et augmente avec la température et le taux d'humidité. La granulation du terrain est un élément important qui influe à la fois sur la porosité et le pouvoir rétenteur d'humidité, et aussi sur la qualité du contact avec les électrodes. Les sols à gros grains (graviers, cailloux, etc...) se prêtent mal à l'établissement de bons réseaux de terre, et on doit y remédier en entourant la surface des électrodes d'une certaine épaisseur de terre fine et grasse ou d'un autre matériau relativement conducteur.

1.4. REPARTITION DES POTENTIELS AUTOUR D'UN RESEAU DE TERRE

Avant d'étudier le comportement d'un réseau de terre écoulant un courant de défaut, 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 types sont à considérer :

- celui du retour du courant à l'infini, comme c'est le cas pour le réseau de terre d'un paratonnerre ou d'un parafoudre écoulant un courant de choc ;
- celui du retour du courant par un autre réseau de terre, comme c'est le cas pour un réseau de terre écoulant un courant de défaut se refermant par un réseau de terre plus ou moins éloigné, ou comme dans le cas de la mesure de la valeur de la résistance du réseau de terre.

1.4.1. Répartition des potentiels avec retour du courant à l'infini - Hémisphère équivalent à une prise de terre

Dans le cas d'un réseau de terre de forme hémisphérique de rayon r_H établi à la surface d'un sol homogène - cas simple traité à titre de référence - les filets de courant s'écoulent radialement dans toutes les directions. Ce sont des rayons passant par le centre du réseau de terre. 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).

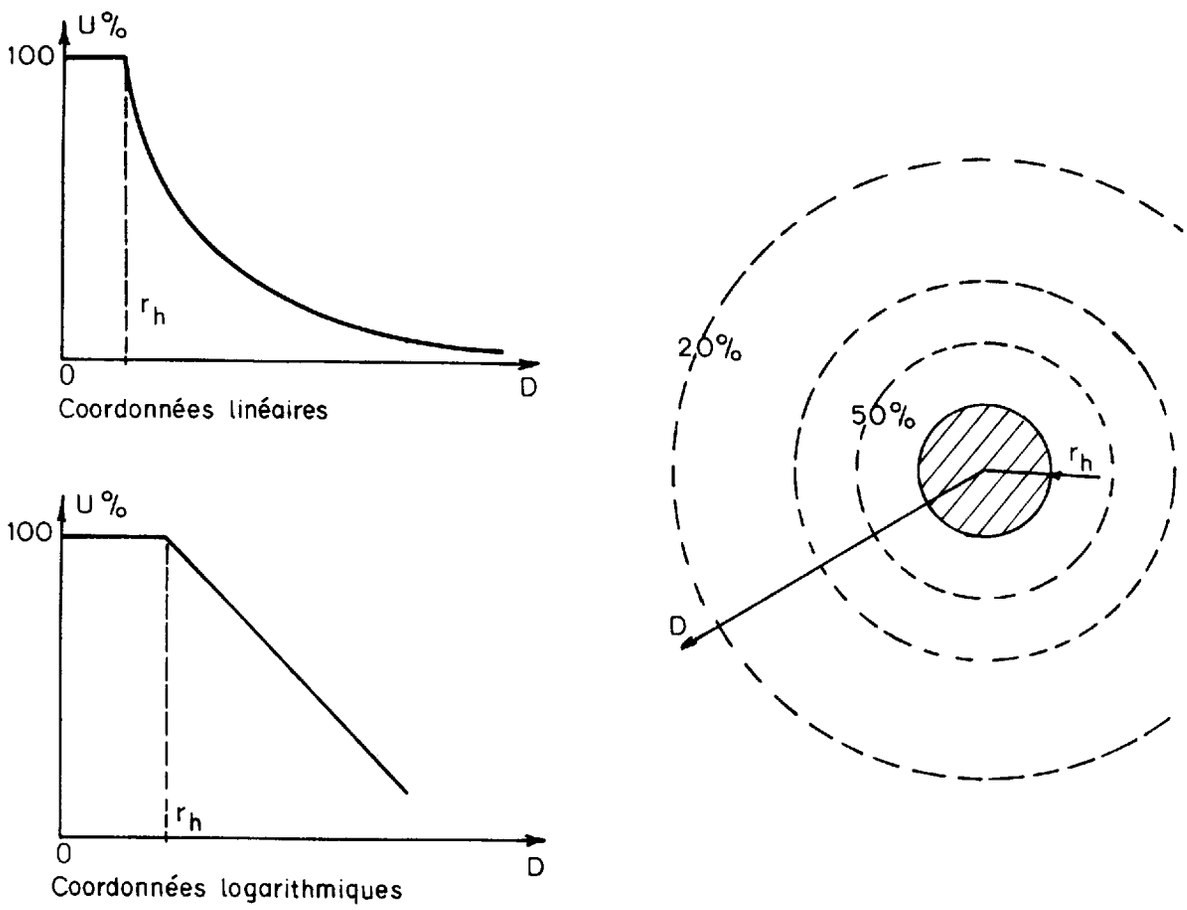


Figure 1 - **Répartition du potentiel autour d'une électrode hémisphérique**

Par rapport à un point de référence infiniment éloigné (« terre lointaine ») 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 courbe représentant les variations du potentiel en fonction de la distance d'éloignement est donc une hyperbole (figure 1). En notant D la distance entre le centre de l'électrode et un point M du sol, ρ la résistivité du terrain et I le courant écoulé, le potentiel du point M s'écrit [1], [2]:

$$U(D) = \frac{\rho I}{2 \pi D} = 0{,}16 \frac{\rho I}{D} \text{ (volts) où } D = k\, r_h$$

le gradient de potentiel (c'est-à-dire sa dérivée) varie comme l'inverse du carré de la distance D :

$$G(D) = \frac{\rho I}{2 \pi D^2} \quad \text{(volts/mètre)}$$

Dans le cas d'une électrode de forme quelconque, la forme des surfaces équipotentielles évolue avec leur éloignement de l'électrode. Elles ont une forme d'autant plus semblable à celle de l'électrode qu'elles en sont proches et, en terrain homogène, d'autant plus semblable à un hémisphère qu'elles sont éloignées de l'électrode (figure 2).

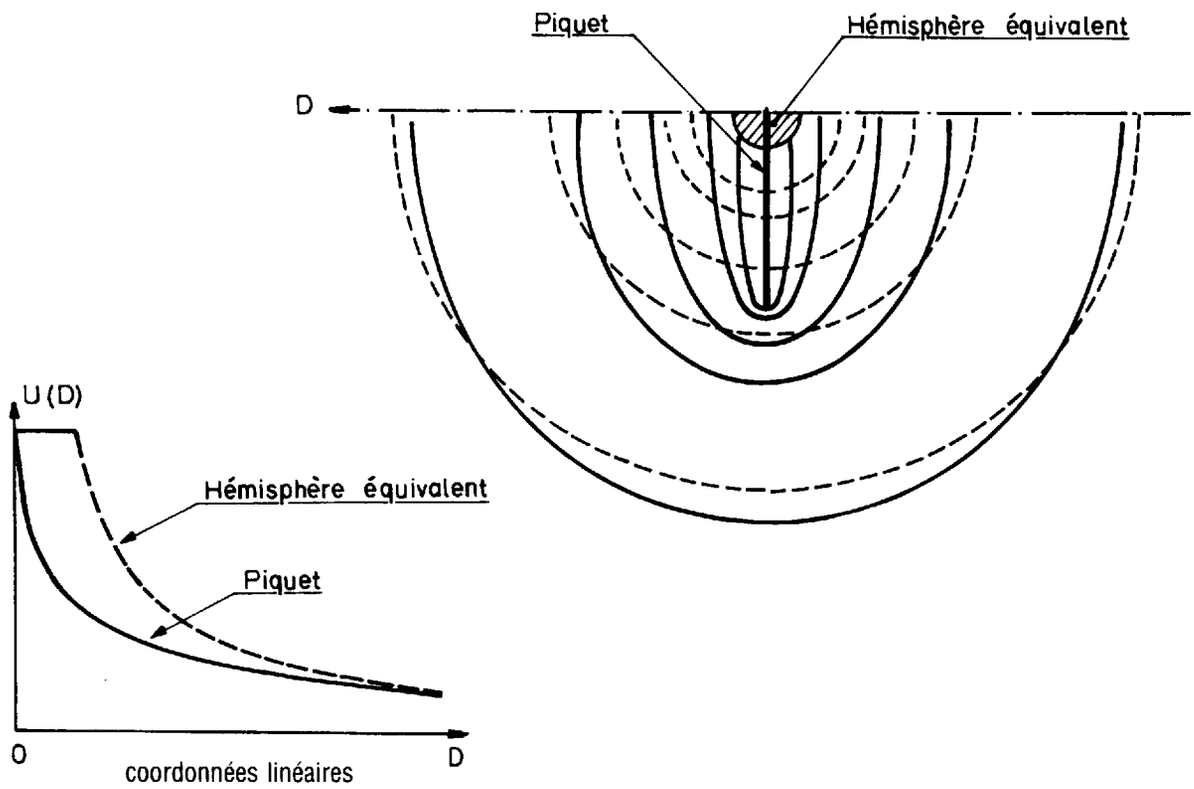


Figure 2 : **Equipotentielles et répartition du potentiel autour d'un piquet et de son hémisphère équivalent.**

Tout réseau de terre possède un hémisphère équivalent défini comme l'électrode hémisphérique de rayon r_h qui, enfouie dans un sol identique, a la même résistance de terre R. En sol homogène, $r_h = \rho / 2 \pi R$.

Les répartitions du potentiel autour d'une électrode et de son hémisphère équivalent sont identiques pour des éloignements importants et, dans la zone de proximité des électrodes, d'autant moins différents que l'électrode considérée est de forme plus compacte.

1.4.2. 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 3).

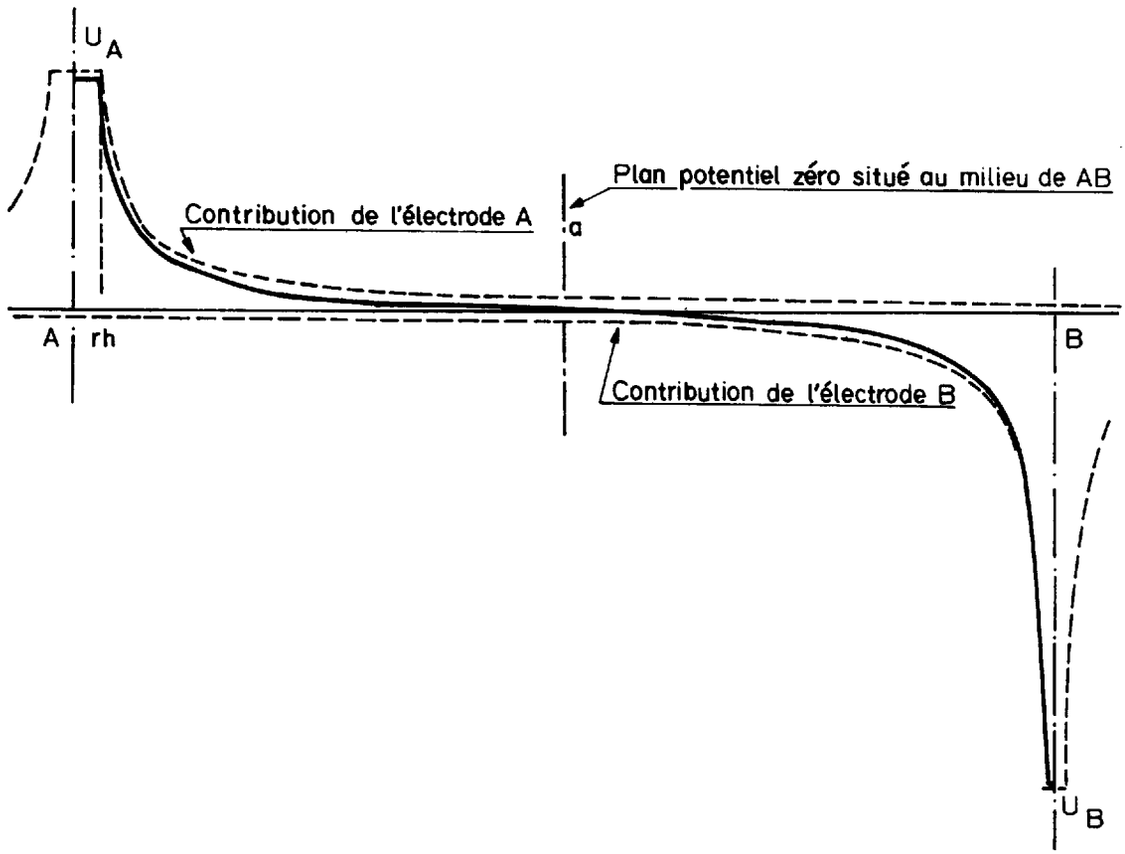


Figure 3 : **Répartition des potentiels, en sol homogène, entre deux prises de terre ponctuelles A et B entre lesquelles circule un courant.**

Au voisinage de chaque électrode, la répartition du potentiel diffère d'autant moins de ce qu'elle aurait été en l'absence de l'autre électrode (cf. paragraphe précédent) que celle-ci est plus éloignée.

Dans le cas d'un sol homogène et de deux électrodes de dimensions faibles devant leur éloignement, la répartition des surfaces équipotentielles s'établit comme l'indique la figure 4. Les surfaces équipotentielles sont identiques à celles qui seraient produites par deux charges électriques égales et de signes opposés.

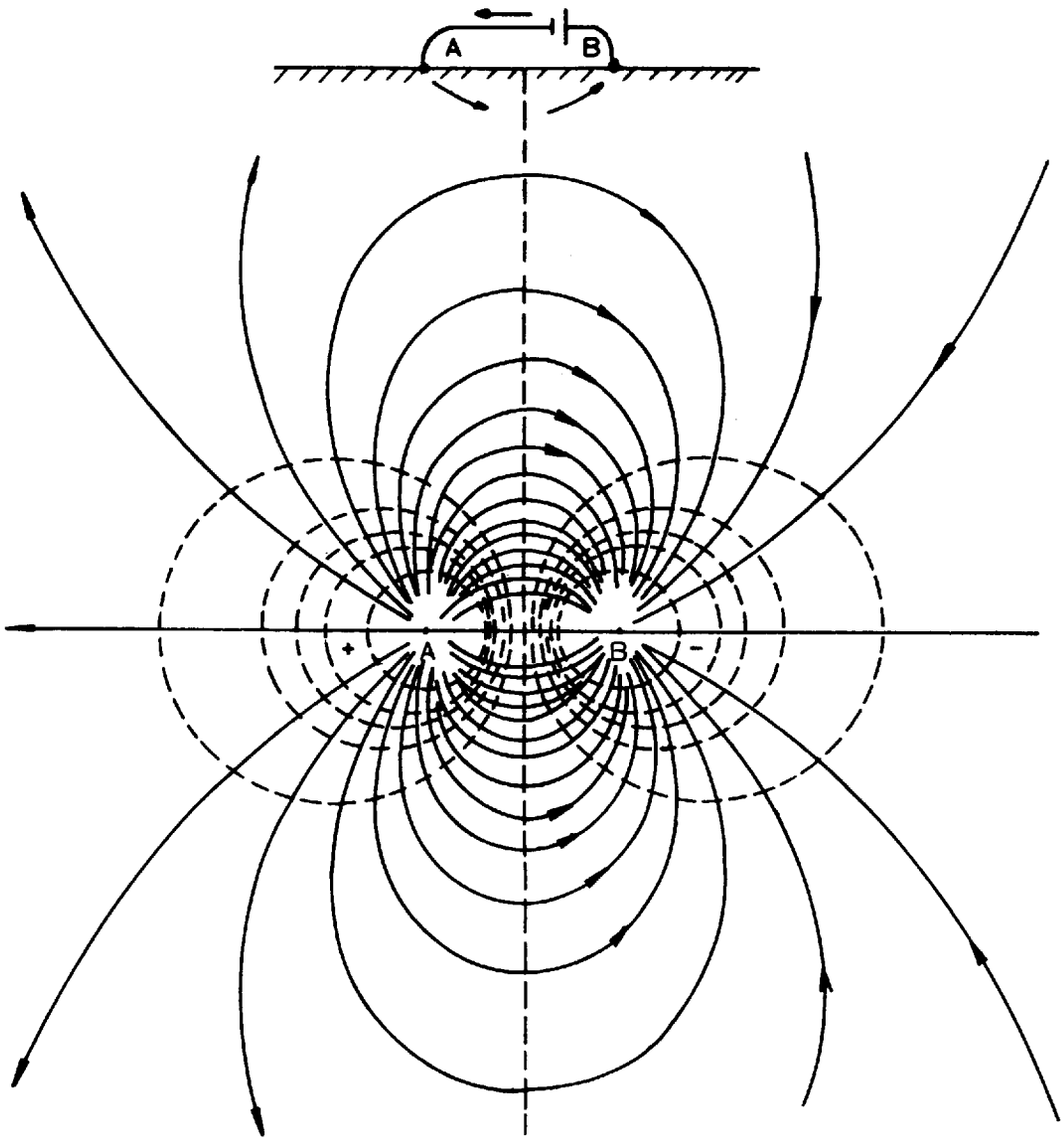


Figure 4 : **Lignes équipotentielles (traits pointillés) et lignes de courant (traits pleins) à la surface du sol, engendrées par la circulation d'un courant entre deux prises de terre de dimensions faibles devant leur éloignement (cas d'un sol homogène).**

1.4.3. Déformation des surfaces équipotentielles dans un sol hétérogène

Lorsque le sous-sol n'est pas homogène, les surfaces équipotentielles ne sont pas des hémisphères mais se déforment en fonction des variations de la résistivité du sol (figure 5) [1].

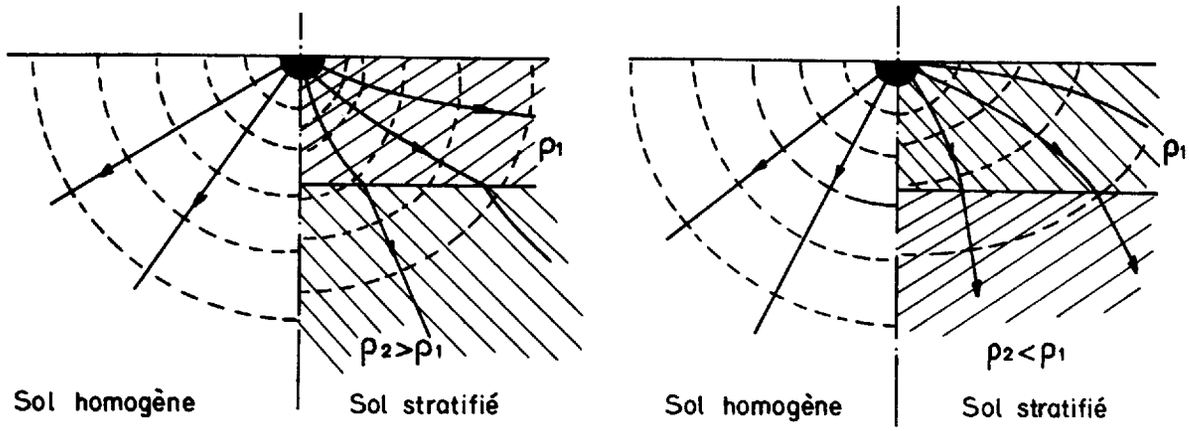


Figure 5 : **Déformation des surfaces équipotentielles autour d'une prise de terre suivant les variations de résistivité d'un sol hétérogène.**

Lorsque le sous-sol est moins conducteur que le terrain superficiel, les filets de courant écoulés par un réseau de terre pénètrent moins rapidement dans le sol que si celui-ci était homogène.

La figure 6 illustre les variations du potentiel autour d'une prise de terre hémisphérique, dans le cas d'un sol stratifié comportant une couche superficielle de résistivité ρ_1 et un sous-sol de résistivité ρ_2.

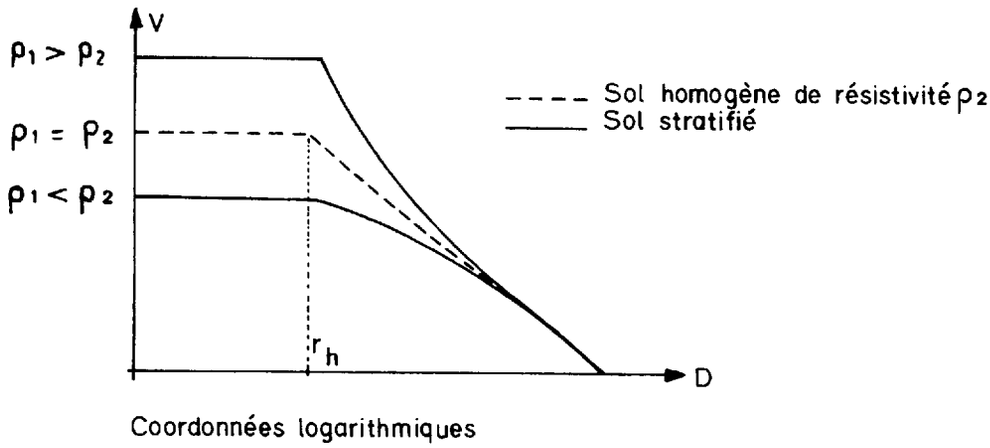


Figure 6 : **Variations du potentiel autour d'un hémisphère à la surface d'un terrain stratifié (coordonnées logarithmiques).**

Pour des éloignements D importants, les variations du potentiel sont avant tout fixées par la résistivité ρ_2 du sous-sol.

1.5. INTERACTIONS ENTRE RESEAUX DE TERRE

On considère que deux réseaux de terre sont électriquement distincts si leur distance est supérieure à dix fois le rayon de l'hémisphère équivalent du plus grand (cf § 4.1). 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.

Soient deux réseaux de terre voisins A et B, de résistances de terre respectives R_A et R_B. L'élévation de potentiel de A lorsque B écoule, seul, un courant I_B dans le sol peut, puisqu'elle est proportionnelle à I_B, s'écrire $R_{AB}\ I_B$ [1]. De même, $R_{AB}\ I_A$ est l'élévation de potentiel de B lorsque A écoule I_A dans le sol. On montre que $R_{AB} = R_{BA}$. 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, grâce au principe de superposition, la somme des contributions des courants I_A et I_B pris isolément. Les élévations de potentiel des électrodes A et B s'écrivent :

$$V_A = R_A\ I_A + R_{AB}\ I_B$$

$$V_B = R_B\ I_B + R_{AB}\ I_A$$

ce qui correspond au schéma équivalent suivant :

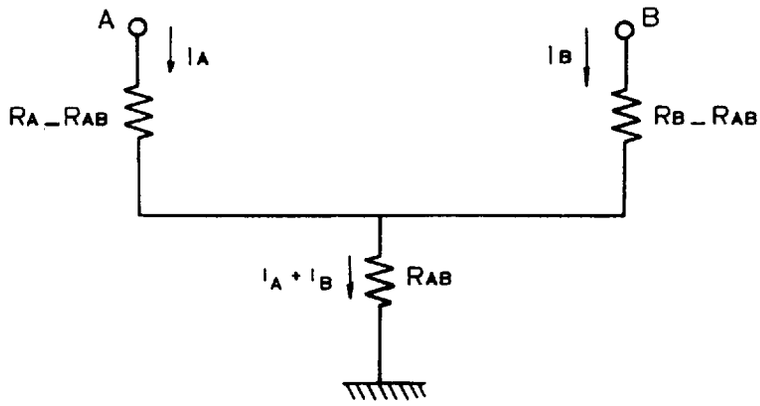


Figure 7 : **Représentation du couplage entre deux réseaux de terre.**

BIBLIOGRAPHIE

[1] : P.G. Laurent
Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre
RGE - T 81 N° 7/8, pp 455-467 et N° 9 pp 563-572 (1972).

[2] : G.F. TAGG
Earth resistances - George Newnes L^ed (London) 1964

2. RESISTIVITE DES SOLS

2.1. INTRODUCTION

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

2.2. METHODES DE MESURE DE LA RESISTIVITE

Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Mentionnons rapidement le prélèvement d'échantillons et la méthode des « deux électrodes »* qui ne fournissent que des indications très locales, et par conséquent insuffisantes, voire trompeuses, pour la conception des prises de terre.

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

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité du sol est celle des « quatre électrodes » qui possède deux variantes, la méthode de WENNER et celle de SCHLUMBERGER, qui se distinguent par la disposition des piquets de mesure [1] [2].

2.3. METHODE DES QUATRE ELECTRODES

2.3.1. Principe de mesure

Pour connaître à l'aplomb d'un point 0 la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant I entre deux prises de terre ponctuelles de très petites dimensions A et B (figure 8).

En sol homogène de résistivité ρ, la valeur du champ électrique E au point O qui est dû à la présence des charges électriques de signes contraires venant de A et de B, a pour valeur :

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

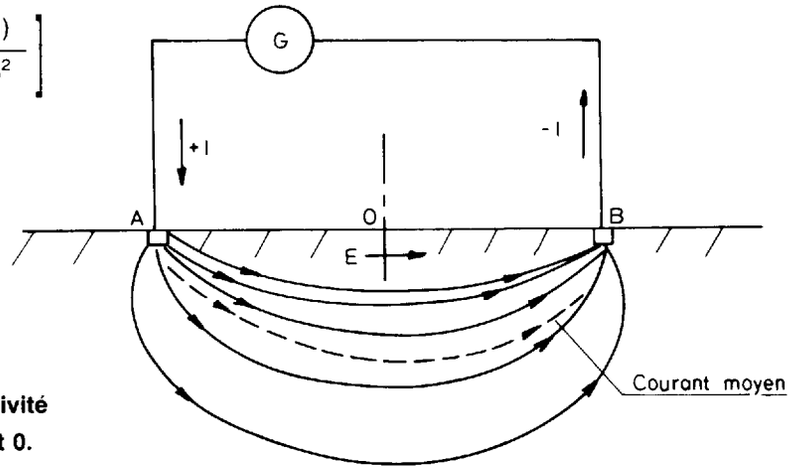


Figure 8 : **Mesure de la résistivité à l'aplomb du point 0.**

* Deux petites électrodes sont fixées sur un piquet isolant qu'on enfonce dans le sol. La mesure de la résistance inter-électrodes donne une indication de la résistivité du sol.

Si le point 0 est situé au milieu de AB, tel que AO = OB = x, on en déduit la formule suivante de la résistivité du sol sous le point 0 :

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I}$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprime la résistivité apparente des couches cumulées du sol sous le point O jusqu'à la profondeur atteinte par le filet de courant moyen circulant entre les électrodes A et B.

En pratique, on détermine le champ électrique E en faisant le rapport entre la différence de potentiel Δ V , qui existe entre deux sondes de terre C et D disposées symétriquement par rapport à O, et leur écartement Δ L (figure 9).

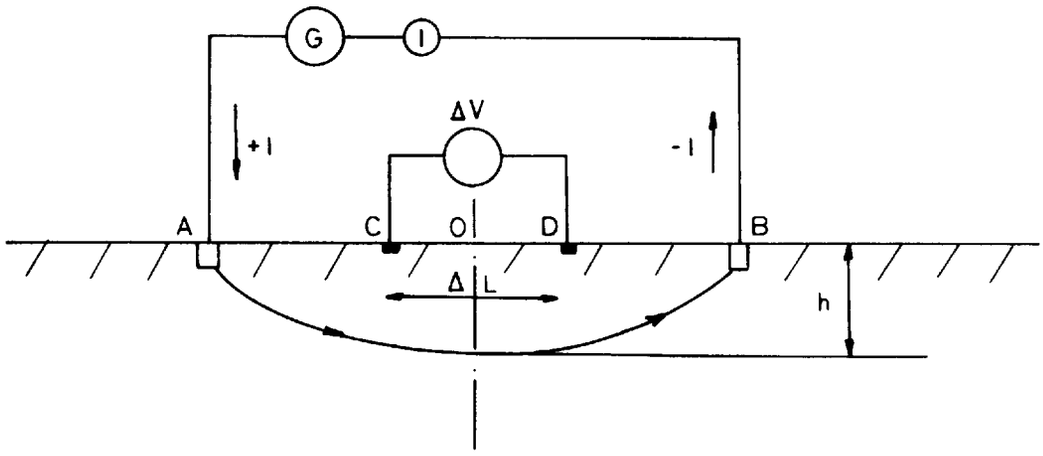


Figure 9 : **Principe de mesure de la résistivité apparente.**

$$E = \Delta V / \Delta L$$

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

On obtient la relation suivante :

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

On en déduit la valeur de la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point 0 :

$$\rho = \frac{2 \pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

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 tellurohmmètre à quatre bornes dont le circuit voltmétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampèremétrique aux prises A et B.

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

2.3.2. **Méthode de Wenner**

La méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée est celle de Wenner dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne et équidistantes [1] [2] [3].

L'appareil de mesure est un tellurohmmètre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celles d'injection du courant de mesure I ; les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel ΔV (figure 10).

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

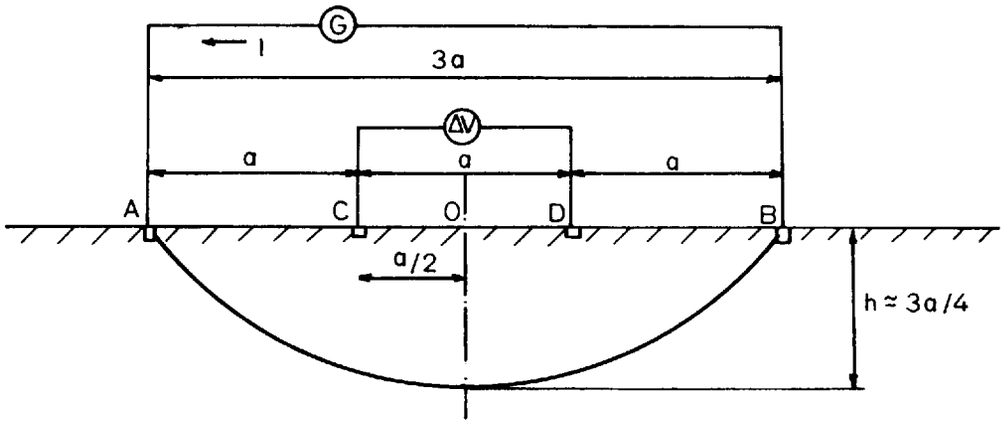


Figure 10 : **Méthode de Wenner.**

La formule générale (cf.§ 2.3.1.) donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches de terrain situées sous le point de mesure se trouve simplifiée avec la méthode de WENNER. Elle devient :

$$\rho = 2\,\pi.\ a\ .\ R$$

ρ = résistivité apparente cumulée en Ω.m
a = base de mesure en mètres
R = valeur en ohms, lue sur le tellurohmmètre, pour obtenir l'équilibre du galvanomètre.

2.3.3. **Notion de profondeur d'investigation**

A l'aplomb des deux électrodes centrales (mesure du potentiel), 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.

La résistivité apparente mesurée par la méthode de WENNER est donc une moyenne des résistivités réelles du terrain, chaque valeur étant pondérée par la densité de courant à la profondeur considérée. En pratique, on peut admettre que la résistivité apparente est essentiellement celle des couches comprises entre la surface du sol et la profondeur à laquelle la densité de courant n'a que la moité de sa valeur en surface [2] [3]. En sol homogène, cette « profondeur d'investigation » h est de l'ordre de grandeur de la distance a séparant deux piquets adjacents (h est compris entre a et 0,75 a).

2.3.4. Choix de la profondeur d'investigation

Les caractéristiques d'un réseau de terre dépendent des caractéristiques du sol jusqu'à une profondeur d'autant plus importante que l'électrode de terre est étendue. La répartition du potentiel en surface dépend davantage de la résistivité des couches de terrain superficielles que ne le fait la résistance de terre [4].

A titre d'exemple, considérons d'abord une électrode hémisphérique de rayon r enfouie à la surface d'un terrain homogène. A une distance 2 r du centre de l'hémisphère, le potentiel d'un point du sol n'est que 50% de celui de l'électrode. A la distance 4 r, cette proportion tombe à 25%.

Un autre exemple est celui d'un disque de rayon r, enfoui à faible profondeur. La répartition du potentiel dans un sol homogène est représentée en figure 11. A une profondeur égale à 2,4 r (dont un calcul montre qu'elle est égale à 3,8 fois le rayon r_h de l'hémisphère équivalent), le potentiel du sol vaut 25% de celui de l'électrode.

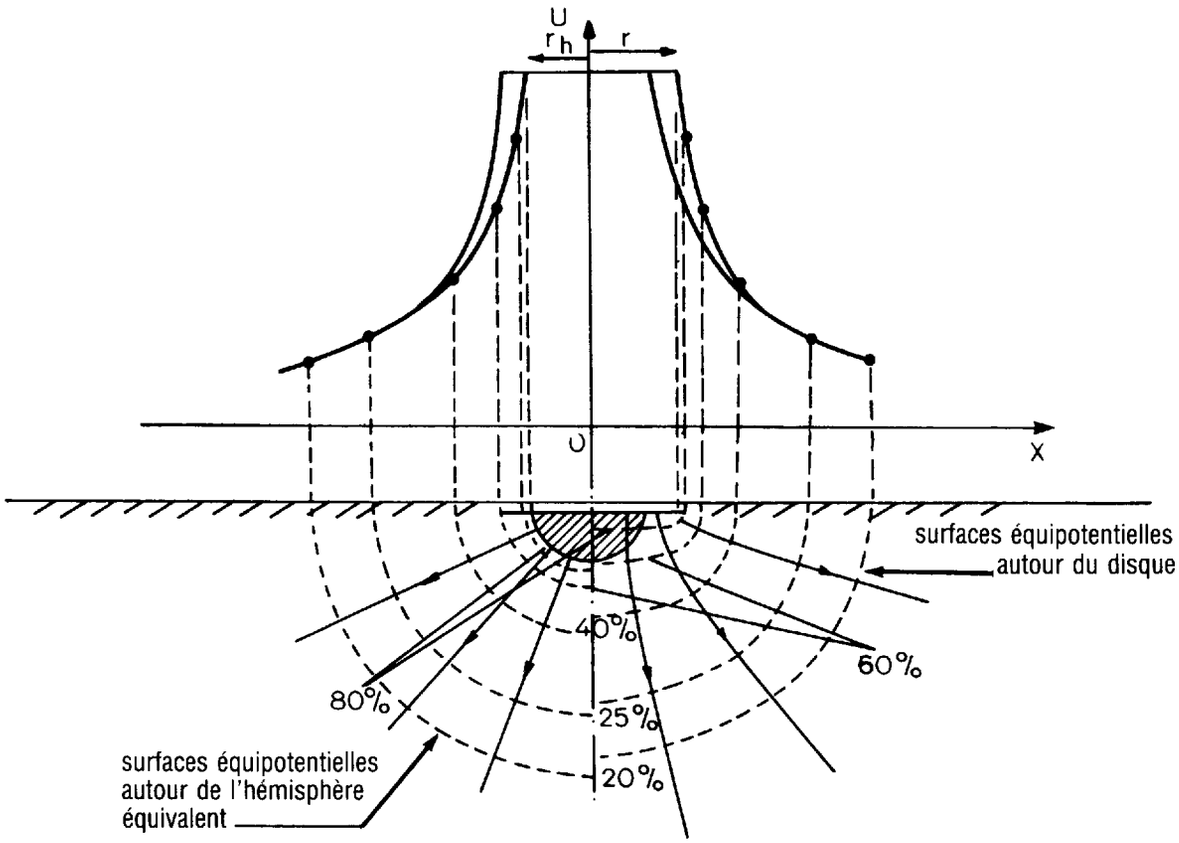


Figure 11 : **Répartition du potentiel et lignes de courant autour d'un disque de rayon r enfoui à la surface du sol.**

En généralisant ces résultats au cas d'électrodes de forme quelconque enfouies en sol homogène, on voit que les caractéristiques électriques d'un réseau de terre sont, pour l'essentiel, déterminées par la portion de terrain comprise entre la surface du sol et une distance d'environ quatre fois le rayon de l'hémisphère équivalent au réseau de terre. Lors de mesures de résistivité par la méthode de WENNER, la profondeur d'investigation doit donc varier entre ces limites.

2.3.5. Difficultés inhérentes aux mesures de résistivité

On a déjà dit que les variations climatiques saisonnières influent sur la résistivité des couches superficielles d'un terrain. C'est pourquoi il faut noter soigneusement les conditions climatiques lors des mesures de résistivité (température et humidité) et, si possible, renouveler les mesures à des époques différentes de l'année.

Les mesures de résistivité peuvent se trouver compliquées par la présence dans la zone prospectée de corps métalliques (canalisation dénudée, par exemple), de filons obliques de terrain très résistants ou très conducteurs venant affleurer la surface [2]. Le franchissement d'un tel « obstacle » par l'électrode d'injection produit une modification du cheminement dans le sol des filets de courant et par là-même du champ électrique sous le point de mesure. Pour mettre en évidence ces causes perturbatrices toujours possibles ou pour, plus simplement, vérifier qu'il n'existe pas de variations sensibles dans l'homogénéité du sous-sol étudié, il faut effectuer deux mesures pour un même point d'investigation, suivant deux axes perpendiculaires ; il est également recommandé de confirmer les résultats obtenus en procédant à des mesures en un autre point proche, situé dans la même zone géologique.

Signalons également une autre cause possible de perturbations lors des mesures de résistivité de sol, liée aux caractéristiques de l'équipement de mesure utilisé. On choisit généralement un tellurohmmètre fonctionnant avec un courant d'injection alternatif pour les mesures de résistivité de terrains. Le courant alternatif permet en effet d'éliminer l'effet parasite de la polarisation des électrodes produit par un courant continu, et de s'affranchir des courants telluriques et vagabonds. A cause de l'effet pelliculaire, le courant alternatif pénètre moins profondément dans le sol que le courant continu. Cet effet est d'autant plus sensible que la fréquence du courant est élevée et que la résistivité du sol est faible. En pratique, cet effet reste généralement négligeable puisque, pour un appareil fonctionnant à 85 Hz par exemple, la profondeur de pénétration du courant est d'environ 550 m pour un sol de résistivité 100 m et 1 700 m pour un sol de résistivité 1 000 m [5].

Tableau de résistivités types

NATURE DU TERRAIN	*RÉSISTIVITÉ (en Ω . m)*
Terrains marécageux	*de quelques unités à 30*
Limon	*20 à 100*
Humus	*10 à 150*
Tourbe humide	*5 à 100*
Argile plastique	*50*
Marnes et argiles compactes	*100 à 200*
Marnes du jurassique	*30 à 40*
Sable argileux	*50 à 500*
Sable silicieux	*200 à 3 000*
Sol pierreux nu	*1 500 à 3 000*
Sol pierreux recouvert de gazon	*300 à 500*
Calcaires tendres	*100 à 300*
Calcaires compacts	*1 000 à 5 000*
Calcaires fissurés	*500 à 1 000*
Schistes	*50 à 300*
Micaschistes	*800*
Granits et grès suivant altération	*1 500 à 10 000*
Granits et grès très altérés	*100 à 600*

2.3.6. Interprétation des résultats

L'évolution de la valeur de la résistivité apparente en fonction de la distance entre piquets fournit une première indication qualitative de la structure du terrain : si cette courbe est décroissante, c'est que le sous-sol est meilleur conducteur que le terrain superficiel, et inversement pour une courbe croissante.

La détermination quantitative de la résistivité du sol à différentes profondeurs se fait en comparant la courbe expérimentale des variations de la résistivité apparente à un jeu d'abaques [6] obtenu par calcul et correspondant à certaines structures de sol bien précises qui sont généralement : sol dont la résistivité varie continûment en suivant une loi exponentielle, sol constitué d'une couche superficielle de résistivité uniforme $\rho 1$ et d'un sous-sol de résistivité $\rho 2$ et même sol à trois couches. La recherche de la structure convenant le mieux aux résultats expérimentaux peut se faire graphiquement ou par calculs sur ordinateur. La structure du sol est ainsi déterminée avec une précision qui dépend uniquement de la manière dont les résultats expérimentaux se superposent aux courbes théoriques, qui peuvent être calculées avec une grande précision.

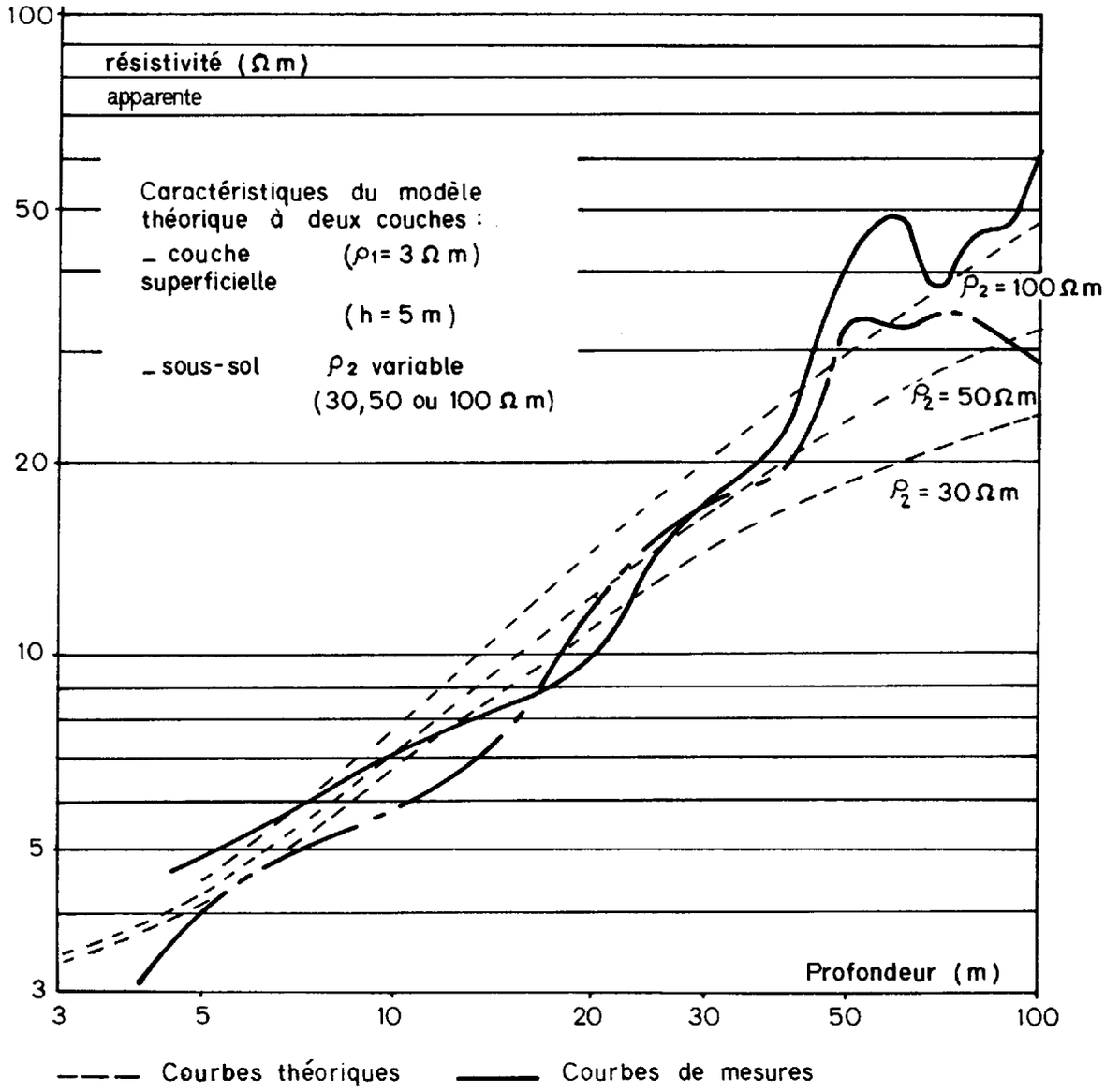


Figure 12 : **Exemple de résultat de mesures de résistivité de sol et de leur interprétation théorique par un modèle de sols à deux couches.**

La figure 12 donne un exemple de courbes de valeurs de résistivité apparente mesurées par la méthode de WENNER (courbes en traits continu et tireté) et calculées à partir d'un modèle de sol à deux couches de résistivités $\rho 1$ et $\rho 2$ (courbes en pointillés). Dans cet exemple, les caractéristiques de la couche superficielle de terrain se dégagent assez clairement (résistivité $\rho_1 \simeq 3\ \Omega$.m sur une profondeur h voisine de 5 m) mais les écarts entre courbes expérimentales et théoriques indiquent que le terrain étudié n'a pas exactement la structure du modèle théorique et empêchent de déterminer avec précision la résistivité du sous-sol, (dont on peut seulement estimer qu'elle est comprise entre 50 et 100 Ω.m).

G.BODIER a proposé une méthode simple pour déterminer la résistivité « réelle » d'un sol à diverses profondeurs, connaissant le profil de la résistivité apparente. On calcule pour cela les valeurs de la résistance de terre d'un piquet fictif qu'on enfoncerait progressivement dans le sol. Le calcul de la résistance du piquet ainsi que celui de la résistivité « réelle » s'appuient cependant sur des simplifications importantes, qui ôtent toute précision aux résultats. En conséquence, les indications fournies par cette méthode sont plus qualitatives que quantitatives.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : IEEE Standard 81(Draft of Part 1) - 1980.
Recommended Guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth.

[2] : G.F. TAGG Earth resistances - George Newnes (1964).

[3] : E.D. SUNDE
Earth Conduction effects in Transmission Systems.
Dover Publ., Inc., New York 1968.

[4] : F. DAWALIBI - D. MUKHEDKAR
Influence of Ground rods on grounding grids. IEEE Transact. on P.A.S., vol PAS 98 - N° 6.
Nov/dec 79 pp. 1659-1668.

[5] : C. GARY - Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes. Bulletin de la DER,
Série B n° 3/4, 1976 pp 5-20.

[6] : Standard Graphs for Resistivity Prospecting.
European Association of Exploration Geophysicists (La Haye).

[7] : G. BODIER. La Résistivité des terrains suivant la profondeur.
Revue IEEE (11/1971).

3. CALCUL ET MESURE DE LA RESISTANCE D'UN RESEAU DE TERRE

Le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre et de la répartition du potentiel dans le sol est - sauf dans le cas d'une électrode hémisphérique enfouie à la surface d'un terrain homogène - extrêmement complexe. Toute solution théorique, même satisfaisante pour les besoins pratiques, n'est jamais rigoureuse.

Rappel : Définitions de la résistance d'une prise de 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 (terre lointaine), au courant qu'on y injecte.

3.1. METHODES DE CALCUL ANALYTIQUES

Les expressions de la résistance de différents réseaux de terre enfouis en terrain homogène sont indiquées pour les cas les plus courants dans le formulaire joint. On se reportera à la littérature dans les autres cas [1] [2] [3]. D'une manière générale, les approximations employées pour établir ces expressions sont d'autant plus grossières que l'électrode est de forme plus complexe. Cependant, compte tenu des variations saisonnières importantes de la résistivité apparente des sols, les formules simplifiées sont suffisantes pour la prédétermination des électrodes de terre de formes simples d'un réseau peu étendu. Sauf dans le cas d'un piquet vertical et dans celui d'un câble enterré horizontalement, on connaît mal la répartition du potentiel à proximité de l'électrode, ce qui est gênant pour la détermination des tensions de pas et de toucher (cf chapitre V).

Les formules correspondant à un terrain stratifié à deux couches sont empiriques et, de ce fait, approximatives.

3.2. METHODES DE CALCUL NUMERIQUES

3.2.1. Besoins et applications typiques

Depuis la fin des années 1970, plusieurs méthodes de calcul numérique sur ordinateur ont été établies par divers auteurs [4] [5] [6] [7] [8]. Ces méthodes, destinées à combler les lacunes des méthodes analytiques (voir ci-dessus) sont avant tout appliquées en pratique à la conception des réseaux de terre d'installations étendues (centrales et grands postes électriques), notamment lorsqu'il est nécessaire d'évaluer les tensions de pas et de contact (cf chapitre 5), et à l'étude de problèmes de voisinage.

3.2.2. Principes généraux

Les méthodes numériques reposent toutes sur le principe de discrétisation, selon lequel une prise de terre filiforme est découpée en un nombre N de petits segments élémentaires rectilignes, repérés par leur indice i – N est d'autant plus élevé que la géométrie de la prise de terre est complexe.

On définit le coefficient R_{ij} comme l'élévation de potentiel du segment (i) lorsque le segment (j) et lui seul écoule dans le sol un courant égal à l'unité. La méthode de calcul des coefficients R_{ij}, qui varie selon les auteurs, ne sera pas détaillée ici. En notant C_h le courant (inconnu) écoulé dans le sol par le segment (h), on peut écrire l'expression du potentiel du segment (i) en appliquant le principe de superposition :

$$V(i) = \sum_{h=1}^{N} R_{ih} C_h$$

Or le potentiel V (i) est constant sur la prise de terre et égal à RI, produit de la résistance R de la prise de terre étudiée (inconnue et faisant l'objet des calculs) et du courant total I s'écoulant de la prise de terre dans le sol

(connu, par hypothèse). La somme des courants, C_h étant égale à I, on peut former le système d'équations suivant :

$$R_{11}\, C_1 + R_{12}\, C_2 + \ldots R_{1N}\, C_N - RI = 0$$

$$R_{i1}\, C_1 + \ldots + R_{ih}\, C_h + \ldots R_{iN}\, C_N - RI = 0$$

$$R_{N1}\, C_1 + \ldots + R_{NN}\, C_N - RI = 0$$

$$C_1 + \ldots + C_h + \ldots + C_N = I$$

Ces N+1 équations permettent de calculer les N + 1 inconnues que sont la résistance de terre R et les N + 1 courants C_h. Connaissant ces derniers, on peut ensuite déterminer le potentiel en tout point du sol.

3.3. PRINCIPES DES METHODES DE MESURE DE LA RESISTANCE D'UN RESEAU 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. Ces électrodes ne pouvant être infiniment éloignées, elles peuvent interagir avec l'électrode étudiée et entre elles (cf § 5. chap. 1) et donc fausser la mesure.

3.3.1. Essais avec une terre connue

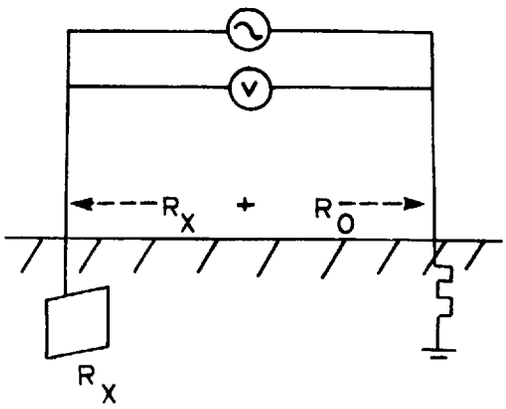


Figure 13

Dans le cas où l'on dispose d'une électrode unique de résistance R_o, connue ou négligeable, pour injecter le courant et mesurer le potentiel, on peut déterminer simplement la résistance de la prise de terre grâce à la relation :

$$V = (R_X = R_0)\, I$$

La même électrode est utilisée pour le retour du courant et comme référence de potentiel. Cette méthode ne doit plus être utilisée car elle présente les inconvénients suivants :

- interaction possible des électrodes (cas de canalisations métalliques enterrées)
- incertitudes sur la valeur de R_0
- impossibilité de contrôler le résultat de mesure.

3.3.2. **Méthode des trois points**

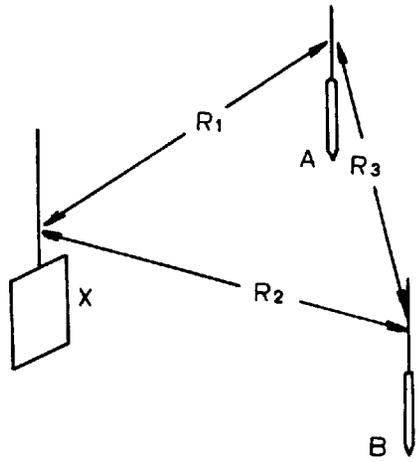


Figure 14

Dans cette méthode on utilise deux électrodes auxiliaires A et B associées à l'électrode de mesure X (figure 14).

On a :

$$R_1 = R_x + R_A$$
$$R_2 = R_x + R_B \qquad \text{d'où } R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$
$$R_3 = R_A + R_B$$

Il faut s'assurer de l'indépendance des prises de terre en écartant suffisamment les électrodes jusqu'à ce que les résistances mesurées soient constantes. Les erreurs commises dans la mesure de R_1, R_2 et R_3 s'ajoutent pour entraîner une erreur qui peut être importante sur R_X, aussi cette méthode doit-elle être utilisée avec circonspection et n'est pas recommandée.

3.3.3. **Méthode de la « Chute de Potentiel »**

3.3.3.1. **Principe**

On associe à l'électrode d'essai deux électrodes auxiliaires placées à une bonne distance de celle-ci.

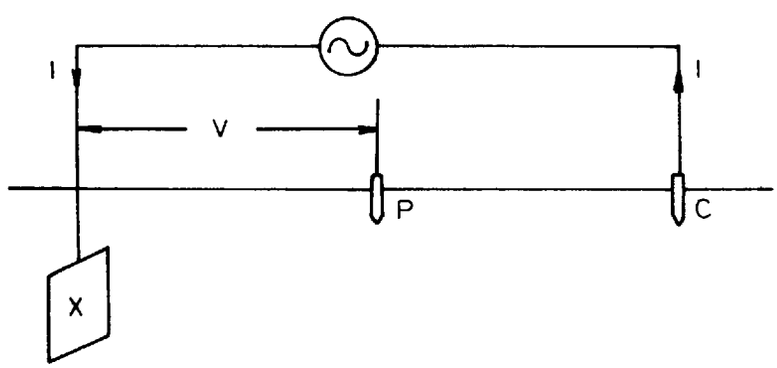


Figure 15

Un courant connu I est injecté entre les électrodes X et C et on mesure la différence de potentiel V entre X et P (figure 15).

Sous certaines conditions, détaillées au paragraphe suivant, la valeur du quotient V/I fournit la résistance de terre de l'électrode X [2, 9].

La méthode de la chute de potentiel pallie les inconvénients des deux méthodes précédentes parce qu'elle permet, grâce au déplacement des électrodes auxiliaires, une vérification simple du résultat de mesure. C'est la seule méthode à employer.

3.3.3.2. Conditions de mesure

Les électrodes X et C écoulent respectivement dans le sol des courants I et −I. Il découle du chapitre 1 que :

- l'interaction entre X et C est d'autant plus forte que ces électrodes sont plus proches,
- le potentiel en tout point du sol résulte à la fois des courants I et −I écoulés par X et C,
- le potentiel en P (qui n'écoule aucun courant dans le sol) dépend fortement de la position de cette électrode par rapport aux deux autres.

La valeur du quotient V/I fournit effectivement une mesure correcte de la résistance de terre de l'électrode X si l'un des deux ensembles de conditions suivants est satisfait :

A - Les deux électrodes X et C sont suffisamment éloignées pour que leur interaction ait un effet négligeable (montée en potentiel de X pratiquement égale à RI) et P se trouve en un point où l'élévation de potentiel est négligeable (P constitue alors une bonne approximation de la « terre lointaine »). Ces conditions sont remplies si la distance entre X et C est au moins 20 fois plus grande que le rayon r_h de la prise de terre hémisphérique équivalente à X (ce rayon est au plus égal à la moitié de la plus grande dimension de 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.

B - 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. Cette règle, établie par Tagg [1] et démontrée en annexe, suppose le sol homogène, hypothèse qui n'est pas nécessairement bien vérifiée. Lorsque le sol est fortement hétérogène, la position idéale de P peut différer sensiblement de la position correspondant à un sol homogène [3]. Aussi vaut-il mieux s'assurer, en pratique, que l'interaction entre X et C n'est pas trop forte, ce qu'on peut faire simplement en déplaçant l'électrode P sur la ligne joignant X à C. Deux cas peuvent alors se présenter (voir la figure 16) :

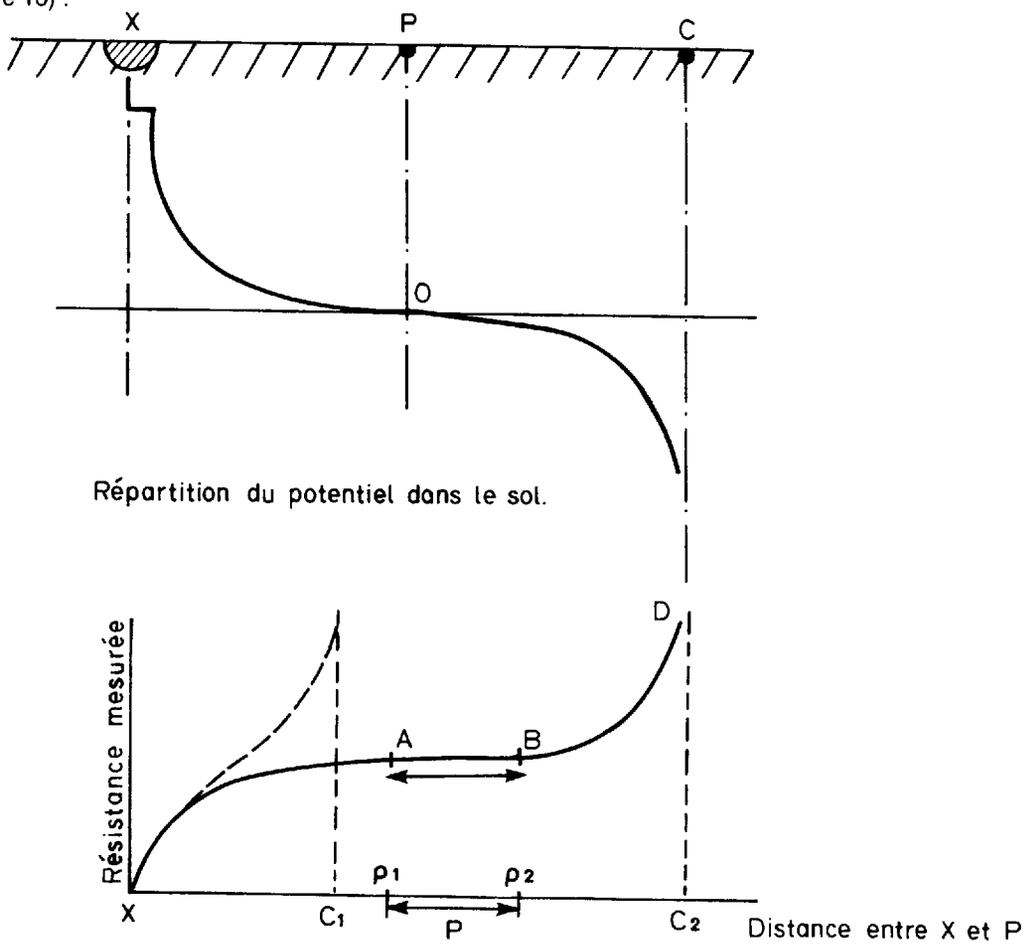


Figure 16 : **Courbes permettant d'apprécier les conditions de mesure**

Selon la distance séparant les électrodes C et X on a l'un des cas suivants :

- 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 (courbe en tiretés sur figure 16).

- 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 assez peu de la position de P, ce dont on peut s'assurer en déplaçant P autour de la position « idéale » (correspondant à la règle des 62 %) (courbes en traits pleins).

3.4. MESURE DE LA RESISTANCE D'UNE PRISE DE TERRE PONCTUELLE

3.4.1. Principe de la mesure par tellurohmmètre

La méthode dite de « La chute de Potentiel » est appliquée grâce à un appareil qui est le tellurohmmètre.

La figure 17 schématise le principe de fonctionnement du tellurohmmètre qui 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, donc d'afficher directement la valeur de la résistance de la prise de terre X (montage en pont dans lequel l'affichage de la valeur de la résistance de la prise de terre mesurée permet d'annuler le courant traversant un galvanomètre).

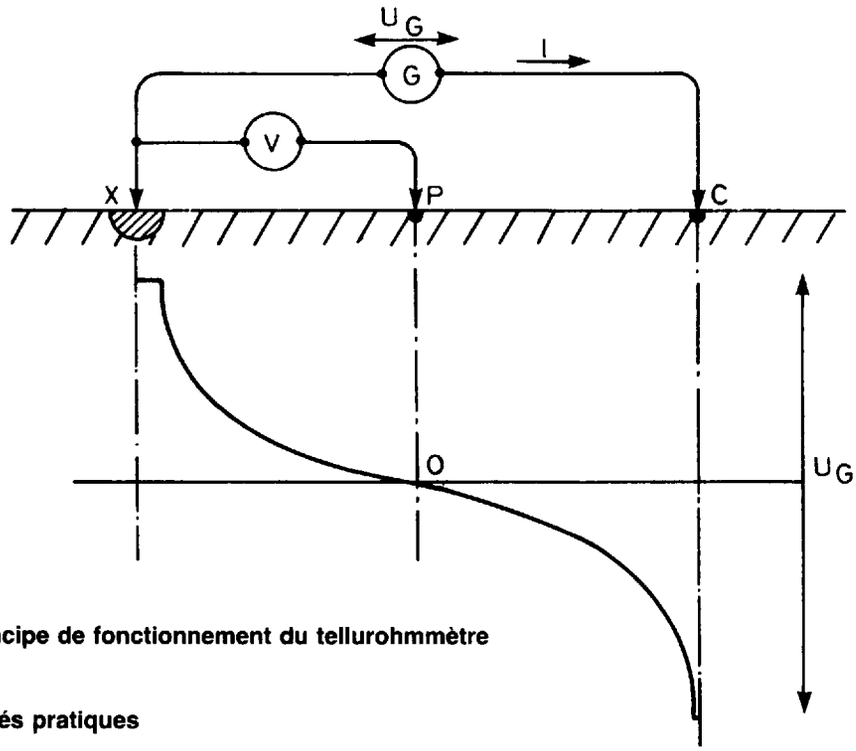


Figure 17 : **Principe de fonctionnement du tellurohmmètre**

3.4.2. Modalités pratiques

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 plupart des tellurohmmètres fonctionnent à une fréquence comprise entre 85 Hz et 135 Hz, quelle que soit leur source d'énergie, magnéto ou piles.

Les prises de terre auxiliaires doivent être disposées suivant les indications du paragraphe 3.3.1*.

Par exemple, pour mesurer la résistance d'un réseau de terre de faible superficie, correspondant approximativement à une boucle de 5 mètres de rayon, enterrée autour d'un petit bâtiment, ou à un conducteur horizontal de 30 mètres de longueur, ou à un piquet vertical d'une quinzaine de mètres de longueur, la sonde d'injection de courant doit être éloignée d'environ une centaine de mètres.

3.5. MESURE DE LA RESISTANCE D'UN RESEAU DE TERRE ETENDU

3.5.1. Généralités

La mesure de la résistance (ou, plus généralement, de l'impédance) d'un réseau de terre étendu présente, par rappport au cas d'une prise de terre ponctuelle, des difficultés accrues [11] à cause de :

- la valeur généralement plus faible (pour un même courant injecté I) de l'élévation de potentiel U, ce qui rend la mesure plus sensible aux perturbations,
- la difficulté qu'il peut y avoir à réaliser, en pratique, les éloignements nécessaires pour éviter les interactions entre électrodes,
- l'accroissement (dû à l'augmentation de la longueur des fils) des couplages entre fils d'injection du courant et de mesure du potentiel,
- l'existence éventuelle d'une composante réactive de l'impédance du réseau de terre (en particulier si des câbles de garde y sont reliés).

3.5.2. Emploi du tellurohmmètre

Le contrôle de la valeur d'un réseau de terre peut être effectué à l'aide d'un tellurohmmètre, à condition d'une part que celui-ci soit assez sensible et que le courant de mesure ne puisse pas être perturbé par les courants telluriques et vagabonds, et que d'autre part, la méthodologie de mesure décrite en 3.3.2.3. soit scrupuleusement observée.

Lorsque l'impédance de réseaux de terre très étendus ne peut être mesurée par le tellurohmmètre à cause de la composante inductive de l'impédance de terre et des tensions induites dans les fils utilisés pour la mesure, il y a lieu d'appliquer une des méthodes décrites ci-après. Ces méthodes, qui présentent toutes plus ou moins d'imprécision, sont des variantes de la méthode de la « chute de potentiel » ; elles diffèrent entre elles par les moyens mis en oeuvre.

3.5.3. Méthodes par injection de courant

Le principe consiste à simuler un défaut dans le poste en injectant un courant d'essai Im à travers la mise à la terre au poste à l'aide d'une ligne aérienne reliée à une électrode de terre auxiliaire en un point éloigné (par exemple, un autre poste)

---

* La majorité des tellurohmmètres sont vendus avec des longueurs de cordon fixes et ne permettent donc pas de toujours remplir les conditions ci-dessus. Il existe alors un risque important à sous-estimer la valeur réelle de la résistance de la prise de terre

Cette méthode de mesure est illustrée par la figure 18.

Pour trouver la valeur correcte de V, le potentiel du réseau de terre doit être mesuré par rapport à une électrode de potentiel placée à des distances croissantes du poste jusqu'à ce que la différence entre deux ou trois lectures successives soit négligeable.

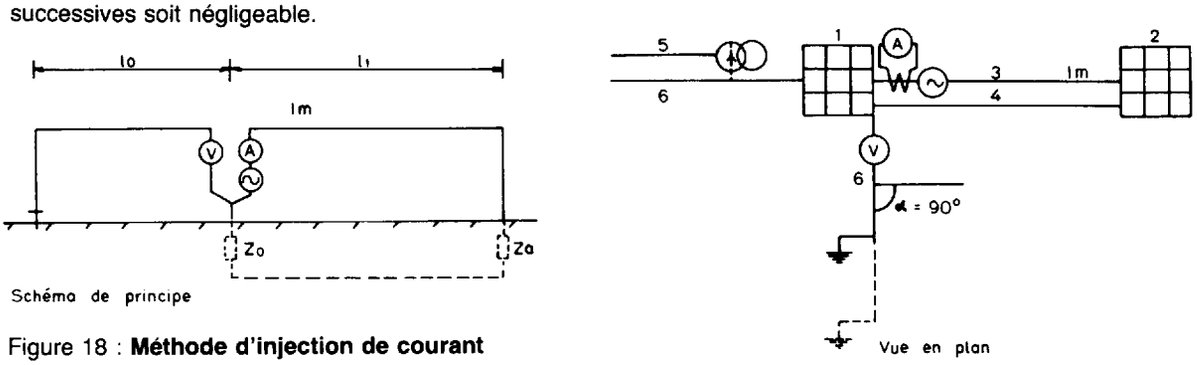


Figure 18 : **Méthode d'injection de courant**

1 : réseau de terre à mesurer ;
2 : réseau de terre auxiliaire ;
3 : ligne de transport pour injection de courant ;
4 : câble(s) de garde ;
5 : ligne de transport en fonctionnement normal ;
6 : conducteur de mesure de potentiel relié à la terre de référence.

Il n'est pas toujours possible d'injecter un courant de mesure suffisamment élevé pour que la présence de perturbations provenant d'autres parties du réseau qui sont en service normal puisse être négligée. En conséquence, il faut utiliser des méthodes qui permettent d'assurer les corrections nécessaires.

Ces méthodes, que l'on trouvera décrites dans la littérature, sont rappelées ici : le principe est toujours de se donner un moyen de séparer les perturbations du signal utile.

3.5.4. Méthode à la fréquence du réseau

Le courant injecté peut être fourni par le réseau basse tension, ou mieux par un transformateur séparé sur lequel il est possible d'inverser la phase ou d'ajuster la tension.

3.5.5. Méthode par battements de fréquence

Cette méthode implique l'utilisation d'une source de courant asynchrone dont la fréquence diffère de 0,1 à 0,5 Hz du réseau. Il faut donc une alimentation séparée. Du fait du battement de fréquence entre le courant injecté et les courants perturbateurs créés par le réseau en fonctionnement normal, la tension mesurée présente des maxima et des minima [5].

3.5.6. Fréquence de courant d'injection nettement différente de la fréquence du réseau

Lorqu'on utilise une fréquence qui s'écarte d'au moins 5 Hz de la fréquence du réseau, le potentiel peut se mesurer au moyen d'appareils sélectifs, en évitant ainsi les tensions perturbatrices à la fréquence du réseau. Cependant, des fréquences qui s'éloigneraient de plus de 10 Hz doivent être évitées si les câbles de garde et les écrans de câbles souterrains constituent des composantes importantes du réseau de mise à la terre, car leur impédance varie assez rapidement avec la fréquence [5, 6, 7, 8].

3.5.7. Guide de mesure et précautions à prendre

Pour éviter les erreurs de mesures, les précautions suivantes doivent être prises, quelle que soit la méthode employée :

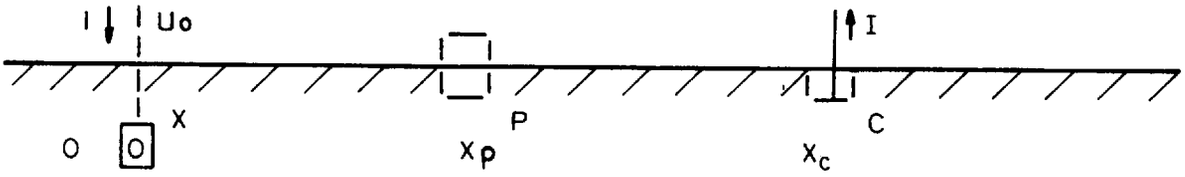
- Le courant injecté doit être si possible supérieur à 50 A pour éviter des imprécisions dues à des perturbations. Cependant, l'élévation du potentiel de terre doit être limitée conformément aux règles de sécurité. Si le courant est trop faible il faut tenir compte des résistances de contact, notamment celles provenant des contacts entre câbles de garde et pylônes.

- Pour l'injection de courant dans la ligne, la longueur de ligne nécessaire pour obtenir une bonne précision ne doit pas être inférieure à 10 km. Dans des zones où la résistivité du sol est élevée, il peut être nécessaire d'utiliser des longueurs nettement plus grandes.
- Quand on procède à des mesures de l'élévation du potentiel de terre, on peut souhaiter aussi mesurer le potentiel de surface de la terre rayonnant depuis le poste. Quand la résistivité du sol est élevée, la chute de potentiel est très faible. Dans un poste où convergent plusieurs lignes, le conducteur de potentiel doit si possible cheminer dans la direction où la distance aux lignes de transport est la plus grande, afin d'éviter des erreurs créées par des tensions induites par des courants circulant dans les câbles de garde ; de même, il faut que l'angle entre la ligne de mesure du potentiel et la ligne d'injection du courant ne soit pas inférieur à 90 degrés. La longueur du conducteur de potentiel nécessaire pour déterminer l'élévation totale du potentiel de terre peut atteindre plusieurs kilomètres dans des régions à haute résistivité.
- On rappelle également l'existence de difficultés possibles concernant :
  . l'induction sur les fils utilisés pour la mesure du potentiel
  . le couplage des câbles de garde de la ligne d'injection avec les conducteurs de phases.

ANNEXE

CALCUL DE LA POSITION OPTIMALE DE L'ELECTRODE DE POTENTIEL

Tagg [1] a établi le premier la « règle des 61,8 % » dont la démonstration est rappelée ici. 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 :

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

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

$$U_o = R I - \frac{\rho I}{2\pi x_c}$$

La tension mesurée est

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

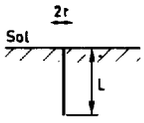
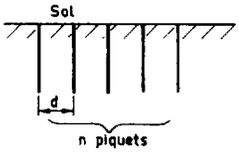
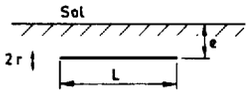
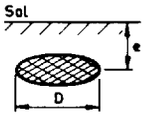
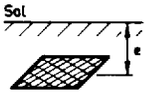
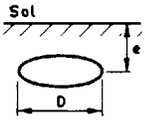
$$V = RI - \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_c} - \frac{1}{x_c - x_p} \right]$$

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

On remarquera que ce calcul ne fait aucune hypothèse sur la proximité des électrodes X et C. La règle est donc théoriquement valable même si X et C interagissent fortement.

FORMULAIRE DE RÉSISTANCES DE TERRE

ρ désigne la résistivité du sol

Forme de la prise de terre	Valeur de la résistance
1. Hémisphère	$R = \frac{\rho}{2\pi r_H}$
2. Piquets 	$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{r} - 1\right)$
	d>L : $R \simeq \frac{1}{n}\left[\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{r} - 1\right) + \frac{\rho}{\pi d}\left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right)\right.$
3. Câble enterré horizontalement 	$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1\right)$
2 câbles proches de longueur L, écartés de la distance d (d << L), enfouis à la même profondeur e	$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt[4]{2redd'}} - 1\right)$ avec $d' = \sqrt{d^2 + 4e^2}$
Plusieurs câbles rayonnants de longueur L, enfouis à la même profondeur e	$R = \frac{\rho}{n\pi L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2re}} - 1 + N(n)\right)$ n : nombre de "rayons" (supposés régulièrement disposés)
	n: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 100 N: 0,7, 1,53, 2,45, 4,42, 6,5, 11, 116
4. Disque 	$e \ll D$ $R = \frac{\rho}{4D}\left(1 - \frac{4e}{D}\right)$ $e \gg D$ $R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi e}$
5. Réseau maillé superficiel 	e petit devant les dimensions de la maille $R \simeq \frac{2\rho}{P}$ P : périmètre
6. Boucle enterrée 	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln\frac{8D^2}{er}$

BIBLIOGRAPHIE

[1] - P.G. LAURENT
Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre. RGE T 81 N° 7/8 et N° 9 (1972).

[2] - G.F. TAGG
Earth resistance. G. Newnes (London).

[3] - E.D. SUNDE
Earth conduction effects in transmission systems (1968)

[4] - F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR
Multistep analysis of interconnected grounding electrodes. IEEE Trans. on PAS, Vol PAS-95, N° 1 (Jan/Feb 1976), pp 113-119

[5] - F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR
Resistance calculations of interconnected grounding electrodes. IEEE Trans. an PAS, VOL PAS-96, N° 1 (Jan/Feb 1977), pp 59-65

[6] - E.B. JOY, A.P. MELIOPOULOS, R.P. WEBB
Touch and step calculations for substation grounding systems.
Paper A 79 052-2 presented at the IEEE PES Winter meeting, New-York, 4-9 Feb. 1979.

[7] - J. NAHMAN, S. SKULETICH
Irregularity connection factors for mesh and step voltages of grounding grids. IEEE Trans. on PAS, Vol PAS-99, N° 1 (Jan/Feb 1980) pp. 174-180.

[8] - P. KOUTEYNIKOFF
Numerical computation of the grounding resistance of substations and towers. IEEE Trans. on PAS, Vol PAS-99, N° 3 (May/June 1980) pp 957-965.

[9] - IEEE Standard 81
Recommended guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth. (Draft of Part 1) (1980).

[10] - F. DAWALIBI - D/ MUKHEDKAR
Resistance measurement of large grounding systems. Paper F 79 656-0 presented at the IEEE PES Summer Meeting, Vancouver (Canada) July 15-20, 1979.

[11] - M. KUUSSAARI - A.J. PESONEN
Mesures de l'impédance de terre des postes HT Rapport 36-02 présenté à la session CIGRE 1978 (Paris) 30 août - 7 septembre.

[12] - H. SELJESTH - A. CAMPLING - K.H. FEIST - M. KUUSSAARI
Mise à la terre des postes vue sous les aspects de la sécurité et des interférences. Electra n° 71, (juillet 1980)

[13] - J.R. ALDERTON - P.C. ANDERSON - R.J. CAKEBREAD
Calculation and measurement of the earth impedance of an e.h.v substation. Proc. IEE, vol 125, N° 12, (Dec. 1978) pp. 1367-1375

[14] - F.P. ZUPA - J.F. LAIDIG
A pratical ground potential rise prediction technique for power stations - IEEE Trans. on P.A.S., vol PAS-99, n° 1, (Jan-Feb 1980), pp. 207-216

[15] - E.P. DICK - C.C. ERVEN - S.M. HARVEY
Grounding system tests for analysis of fault-induced voltages on communication cables - Paper F 79 173-6 presented at the IEEE PES Winter Meeting, New-York (USA) February 4-9, 1979

[16] - I.D. LU - R. M. SHIER
Application of a digital signal analyzer to the measurement of power system ground impedances. IEEE Trans. on P.A.S. vol. PAS-100, n° 4 (April 1981) pp. 1918-1922

4. COMPORTEMENT DES PRISES DE TERRE EN REGIME TRANSITOIRE

4.1. INTRODUCTION - PARTICULARITES DU COMPORTEMENT DES PRISES DE TERRE EN REGIME TRANSITOIRE

4.1.1. Les « courants transitoires »

Nous appellerons dans ce chapitre « courants transitoires », les courants pouvant apparaître en un point du réseau électrique, d'une durée courte (de quelques dizaines à plusieurs centaines de microsecondes) et d'une amplitude suffisamment importante pour donner lieu à des défauts ou à des perturbations sur les installations. Cette définition générale englobe bien sûr les impulsions de courant de foudre (dont l'amplitude moyenne atteint plusieurs kiloampères) mais aussi les courants s'écoulant dans le réseau de terre d'un poste lors de la manoeuvre d'appareils et dont l'amplitude, bien que modérée, peut induire des tensions perturbatrices importantes dans la filerie à basse tension.

4.1.2. Constatations expérimentales

En basses fréquences (signal sinusoïdal ou transitoire à variations lentes) l'élévation du potentiel d'une prise de terre est, à tout instant, proportionnelle au courant qu'elle écoule dans le sol, pourvu que ce courant ne soit pas d'amplitude « trop grande ». On a constaté expérimentalement qu'il n'en allait pas de même lorsque le courant injecté possède soit des variations très rapides, soit une amplitude importante (voir pour plus de détails les deux excellentes études bibliographiques [1] et [2] ainsi que la synthèse [3] :

- Dans le cas d'impulsions de courant à front très bref, on observe que le maximum de l'élévation de potentiel apparaît avant le maximum de l'impulsion de courant et qu'il possède une amplitude supérieure au produit de la résistance de terre (mesurée à basse fréquence) par la valeur crête du courant. Une telle surtension résulte essentiellement d'effets inductifs dans les conducteurs de la prise de terre considérée.
- Dans le cas d'impulsions de courant ayant une grande amplitude et des variations pas trop rapides, on peut observer au contraire que le maximum de l'élévation du potentiel de terre est inférieur au produit de la résistance de terre par la valeur maximale du courant. Cet effet d'écrêtage est dû à des phénomènes disruptifs dans le sol.

Ces deux types de phénomènes peuvent bien sûr se combiner lorsque l'impulsion de courant écoulée par la prise de terre possède à la fois des variations très rapides et une amplitude très grande, comme cela peut être le cas de certaines impulsions de courant de foudre [4, 5].

4.2. COMPORTEMENT D'UNE PRISE DE TERRE EN FONCTION DE LA FREQUENCE

La description des phénomènes inductifs qui peuvent apparaître dans les conducteurs de terre se fait plus facilement en régime harmonique (signaux sinusoïdaux) qu'en régime transitoire, aussi commencerons-nous par rappeler quels sont les moyens de passer d'un régime à l'autre.

4.2.1. Rappels sur la décomposition harmonique d'un signal transitoire

Toute grandeur réelle fonction du temps, x(t), peut être décomposée en une somme de fonctions trigonométriques complexes - de la forme $A(f)\ e^{2\pi jft}$ - dont chacune est caractérisée par sa fréquence f et son amplitude complexe A (f).

Puisque $e^{2\pi jft} = \cos(2\pi ft) + j \sin(2\pi ft)$, cette décomposition revient à représenter x(t) comme une somme de fonctions sinus et cosinus. Inversement, on obtient, à partir d'une suite de valeurs complexes A(f) satisfaisant à certaines conditions, une fonction réelle du temps en calculant la somme des fonctions complexes $A(f)\ e^{2\pi jft}$. A toute fonction x(t) correspond une suite de coefficients A(f) et une seule. L'opération mathématique permettant de déterminer les valeurs A(f) en fonction de x(t) (et réciproquement) est la Transformation de Fourier.

Le spectre d'un signal transitoire x(t) est constitué de l'ensemble des valeurs A(f). Plus les variations de x(t) sont rapides et plus le spectre est riche en composantes de fréquences élevées.

Prenons, à titre d'exemple, la fonction double exponentielle qui est souvent utilisée pour représenter de manière idéalisée les impulsions de courant de foudre :

$$x(t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}$$

Les composantes de son spectre ont pour expression :

$$A(f) = \frac{\beta - \alpha}{(\alpha + j2\pi f)(\beta + j2\pi f)}$$

Pour une onde d'un temps de front de l'ordre de 1 µs, le spectre comprend des composantes d'amplitude significative jusqu'à une fréquence de l'ordre de 1 MHz.

4.2.2. Effets inductifs dans les conducteurs de terre

En basses fréquences ou pour des courants transitoires à variations lentes, l'impédance longitudinale des conducteurs formant une prise de terre de dimensions courantes* est négligeable devant sa résistance de terre. Lors de l'écoulement d'un courant par une prise de terre, les chutes de potentiel dans les conducteurs de terre sont donc négligeables devant la montée en potentiel de la prise de terre.

Cependant, l'impédance des conducteurs étant, à partir de quelques centaines de hertz, de nature essentiellement inductive, elle varie d'une manière sensiblement proportionnelle à la fréquence. En hautes fréquences, l'impédance longitudinale des conducteurs de terre peut donc ne plus être négligeable, voire devenir prépondérante, devant la résistance de terre mesurée en basses fréquences. Dans ce cas, l'impédance d'une prise de terre n'est plus purement résistive (comme en basses fréquences), mais possède une composante inductive. L'écoulement d'un courant transitoire par une prise de terre peut donc faire apparaître les phénomènes suivants :

- aux instants où le courant varie le plus rapidement, la prise de terre présente une impédance apparente (valeur instantanée du rapport U/I) supérieure à sa résistance en basses fréquences et ceci d'autant plus que les variations du courant sont plus rapides,
- l'écoulement du courant des conducteurs de terre dans le sol se fait avec une répartition différente car l'effet de freinage dû à l'impédance des conducteurs tend à limiter la zone d'écoulement aux abords immédiats du point où le courant transitoire pénètre dans la prise de terre.

L'importance de ces effets dépend beaucoup de la forme du courant transitoire (ou, ce qui revient au même, de son spectre), de la géométrie de la prise de terre et de la résistivité du sol dans lequel celle-ci est enfoncée.

4.2.3. Caractérisation d'une prise de terre en hautes fréquences : notion d'impédance harmonique

La notion d'impédance harmonique permet de caractériser quantitativement le comportement d'une prise de terre en basses et hautes fréquences d'une manière très commode. On définit l'impédance harmonique d'une prise de terre, en régime sinusoïdal, comme la valeur du rapport U/I (U est l'élévation du potentiel de la prise de terre et I le courant injecté**). C'est une quantité a priori complexe (puisque le potentiel et le courant ne sont pas toujours en phase) et variable en fonction de la fréquence. Elle est indépendante du courant I, contrairement à l' « impédance transitoire » définie plus loin en 4.3.4.

---

* n'excédant pas quelques centaines de mètres, ce qui n'est plus le cas des réseaux de terre des grandes Centrales et des très grands Postes.

** Ce sont des quantités complexes puisqu'on emploie ici, comme habituellement en théorie des circuits, la notation de Fresnel.

Les figures 19 et 20 représentent les variations de l'impédance harmonique de cinq prises de terre de formes variées, telles qu'elles ont été mesurées lors de coup de foudre réels ou avec un générateur de chocs [6]. On observe que l'impédance d'un hémisphère, prise de terre massive où les effets inductifs ne jouent guère, reste sensiblement constante en fonction de la fréquence. On vérifie également qu'une étoile à deux branches opposées présente, en hautes fréquences, une impédance plus faible qu'un câble rectiligne enterré horizontalement de même longueur (donc de même résistance en basses fréquences).

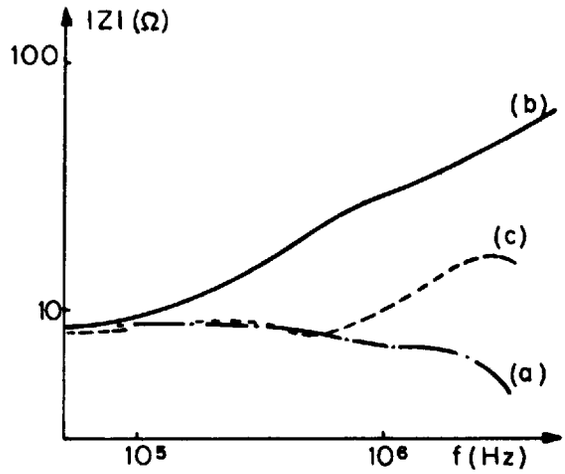


Figure 19 - **Impédance de terre d'un hémisphère (a), d'un câble horizontal (b), d'une double boucle (c).**

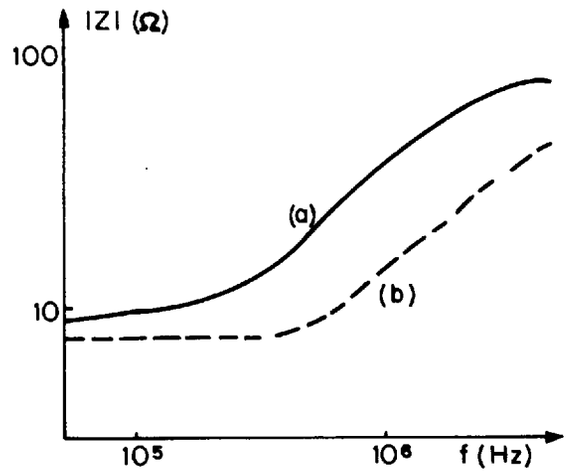


Figure 20 - **Impédance de terre d'un piquet (a), d'une étoile à deux branches (b).**

4.2.4. **Cas d'un câble enterré horizontalement**

L'étude de l'impédance harmonique d'un câble enterré horizontalement présente un intérêt particulier car d'une part c'est un type de prise de terre couramment utilisé et d'autre part il se prête bien à une modélisation théorique et conduit à des conclusions d'intérêt pratique.

On montre [7] que, du point de vue électrique, une prise de terre constituée d'un câble enterré horizontalement est assimilable à une ligne de transmission à constantes réparties (figure 21).

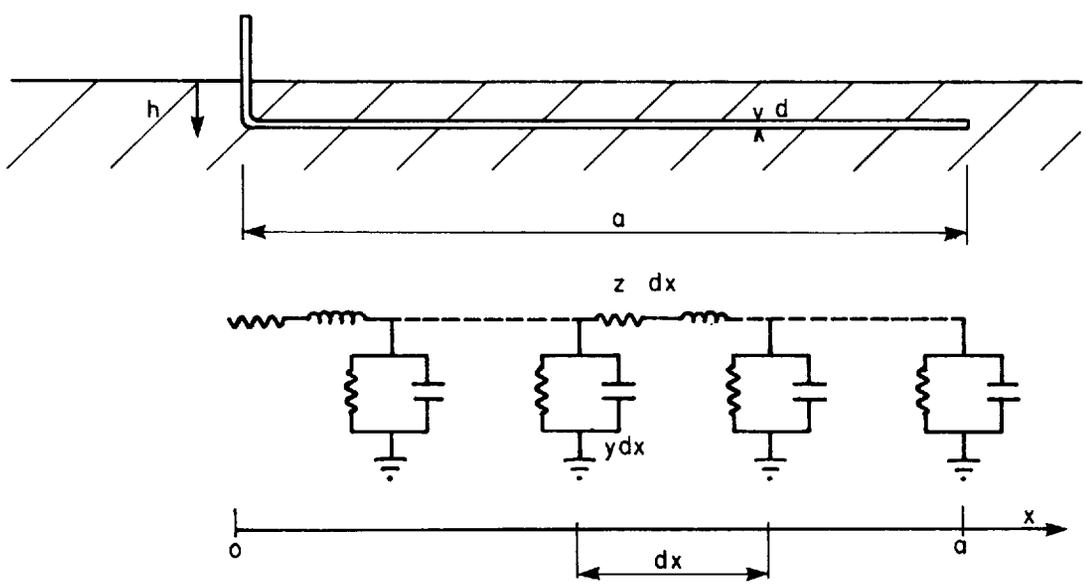


Figure 21 - **Câble enterré horizontalement et schéma équivalent.**

Cette représentation permet d'établir l'expression de l'impédance de terre harmonique d'un câble enterré horizontalement :

$$Z = \sqrt{R\,(R + j\,2\,\pi\,Lf)}$$

où R est la résistance de la prise de terre en basses fréquences, L la self-inductance totale du conducteur de terre (produit de la self-inductance linéique par la longueur du câble) et f la fréquence. R est, en première approximation, proportionnelle à l'inverse de la longueur a de la prise de terre.

Au-delà de la fréquence $f_c = R/2\,\pi\,L$ qui, grossièrement, varie comme l'inverse du carré de la longueur du câble, l'impédance de terre harmonique du câble posssède les propriétés remarquables suivantes :

- elle est pratiquement indépendante de la longueur du câble,
- elle est proportionnelle à la racine carrée de la résistivité du sol,
- elle est proportionnelle à la racine carrée de la fréquence (comme on peut le vérifier sur la figure 19).

Ces caractéristiques justifient notamment le fait que, pour mettre un pylône ou un paratonnerre à la terre, il soit plus efficace de diviser la prise de terre en plusieurs brins (en « patte d'oie ») plutôt que d'utiliser un seul conducteur de terre de même longueur totale.

L'équivalence entre le câble enterré horizontalement et une ligne de transmission permet d'évaluer la « longueur efficace » de la prise de terre en hautes fréquences, c'est à dire la distance au-delà de laquelle l'impédance longitudinale du câble « freine » trop la propagation du courant pour que le conducteur participe encore de manière efficace à la mise à la terre. L'ordre de grandeur de cette longueur efficace est donné par l'inverse de la partie réelle $\Re(\gamma)$ de la constante de propagation γ* de la ligne de transmission :

$$L_e \approx \frac{1}{\Re(\gamma)}$$

On montre que, au-delà de la fréquence f_c, L_e est inversement proportionnelle à la fréquence. Ce résultat théorique confirme l'idée intuitive que, plus la fréquence est élevée, moins les éléments d'une prise de terre éloignés du point d'injection du courant participent efficacement à l'écoulement du courant dans le sol. Le comportement d'une prise de terre en régime transitoire ne peut donc pas être caractérisé par une valeur unique de longueur efficace puisque :

- un régime transitoire est la somme de régimes harmoniques auxquels sont associées différentes valeurs de la longueur efficace,
- le spectre des courants transitoires écoulés par un prise de terre varie généralement dans des proportions considérables d'un évènement à l'autre (cas des coups de foudre, par exemple).

4.2.5. **Autres phénomènes apparaissant en hautes fréquences**

Mentionnons rapidement deux autres phénomènes qui peuvent apparaître en hautes fréquences, mais dont les connaissances actuelles permettent toutefois de dire qu'ils ont des effets nettement moindres que la self-inductance des conducteurs d'une prise de terre :

- la capacité ** de la prise de terre par rapport au sol peut, en très hautes fréquences et dans les sols de résistivité élevée, réduire l'impédance apparente en « shuntant » la résistance de terre,
- l'effet de peau (résultant du couplage inductif entre les lignes de courant) tend à rapprocher les lignes de courant de la surface du sol quand la fréquence augmente.

---

* On rappelle que γ est égal à la racine carrée complexe du produit de l'impédance linéique par l'admittance linéique de la ligne de transmission.

** La capacité C et la résistance de terre R sont liées par la relation simple $RC = \rho\varepsilon$ (ε : permittivité absolue du sol).

4.3. COMPORTEMENT D'UNE PRISE DE TERRE EN FONCTION DU COURANT

4.3.1. Champ électrique dans le sol

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

$$\vec{E} = \rho \vec{J}$$

ρ étant la résistivité du sol.

Puisque les lignes de courant divergent en s'éloignant de la prise de terre, le champ électrique $\vec{E}$ est d'autant plus élevé qu'on se place près de la prise de terre.

Or, on a constaté que le champ électrique dans le sol ne peut dépasser certains niveaux sans que se produisent dans le sol des claquages réduisant, de manière réversible, la résistivité apparente du terrain et par conséquent l'impédance apparente de la prise de terre.

4.3.2. Phénomènes de claquage dans le sol

Les processus physiques qui sont à l'origine des claquages dans les matériaux sont divers. Il ne semble pas qu'on connaisse, à l'heure actuelle, le mécanisme des claquages se produisant dans les sols. La valeur du champ critique E_c - au-delà duquel on observe une réduction de la résistivité apparente du sol - varie, selon les auteurs, la nature du terrain et son état (humidité, en particulier), de 500 à 4 000 V/m environ. De plus, certaines études [7] ont montré que ces phénomènes de claquage évoluent au cours du temps, ce qui complique encore leur caractérisation.

4.3.3. Caractérisation du comportement des prises de terre

On définit l' « impédance transitoire » ou la « résistance impulsionnelle » d'une prise de terre comme l'ensemble du graphe Z(t) = U(t)/I(t) correspondant à une onde de courant donnée ou parfois, plus sommairement, comme la valeur minimale de Z(t), ou encore comme la valeur de Z(t) à l'instant du maximum de U(t). Dans tous les cas, l'impédance transitoire dépend de la forme et de l'amplitude du courant injecté I(t), inconvénient qu'on ne saurait éviter dès lors qu'on essaie de caractériser un phénomène non linéaire. En principe, la caractérisation complète d'une prise de terre nécessite donc la donnée d'une série de graphes Z(t) correspondant à différentes impulsions de courant (rappelons que la caractérisation d'une prise de terre en hautes fréquences est, grâce à la relation d'impédance harmonique, beaucoup plus simple : cf 6.2.3.).

Certains auteurs ont cherché à simplifier cette caractérisation, soit en utilisant une modélisation empirique des phénomènes de claquage dans le sol [8], soit en simplifiant la définition de l'impédance transitoire (valeur unique au lieu d'un graphe) et en utilisant des lois de similitude pour établir des lois générales [10].

4.3.4. Résultats expérimentaux

A titre d'exemple, voici deux figures extraites d'articles consacrés au comportement des prises de terre en fonction du courant.

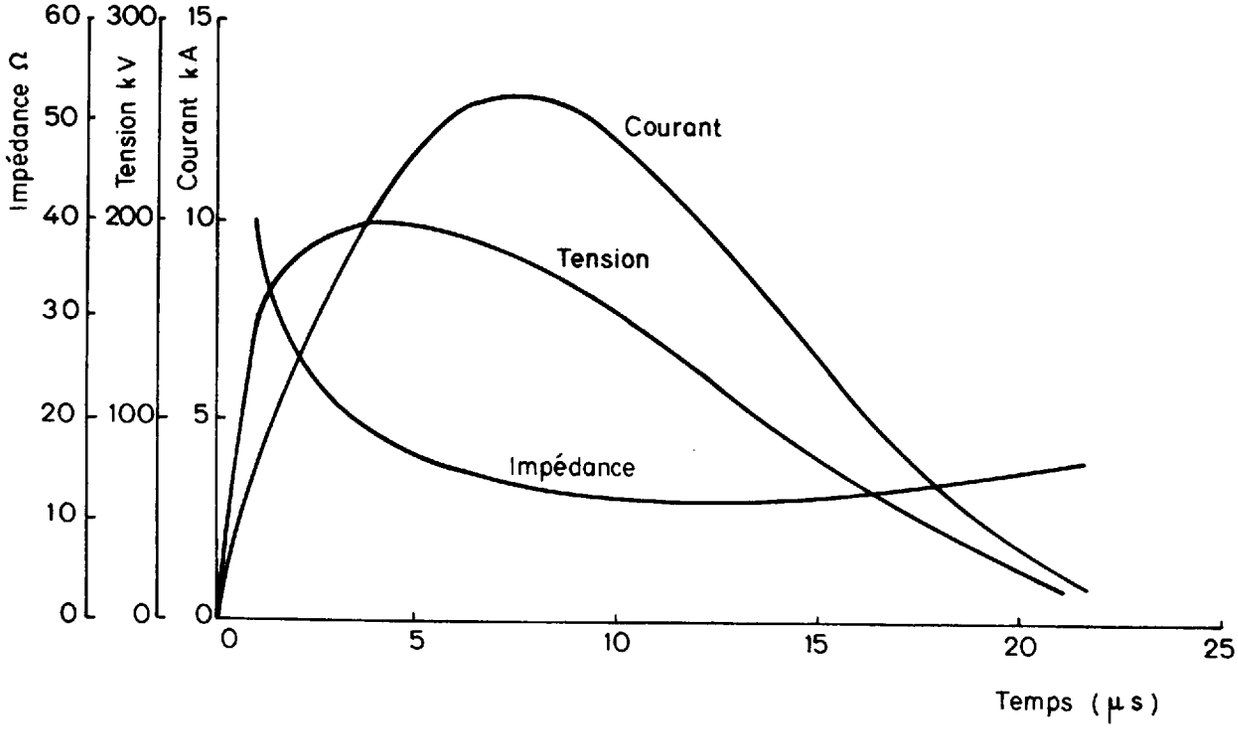


Figure 22 - **Courant injecté, montée en potentiel, impédance transitoire dans le cas d'un piquet dont la résistance en courant faible est égale à 65 Ω [8].**

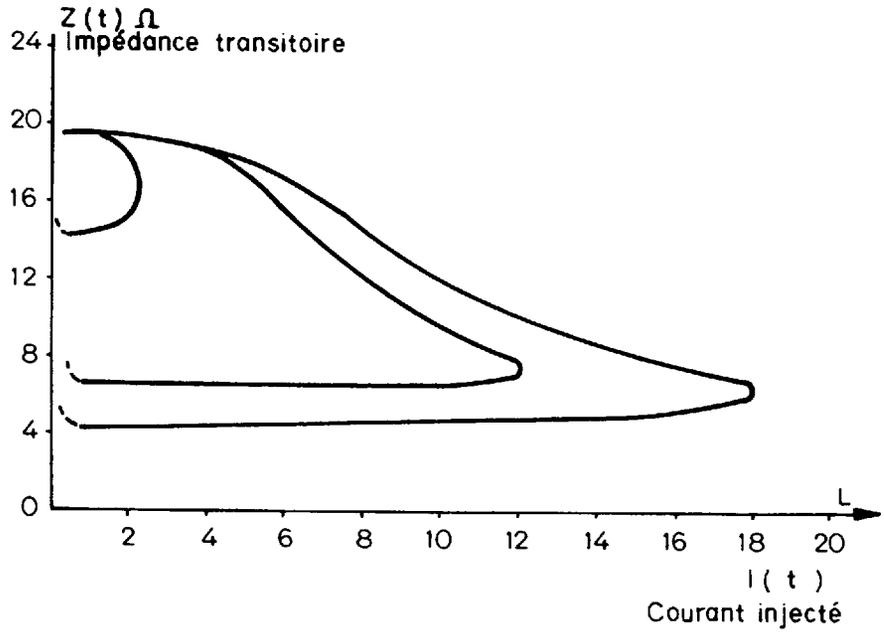


Figure 23 - **Impédance transitoire d'un massif de pylône [9].**

La réduction de l'impédance apparente des prises de terre apparaît clairement dans les deux cas.

4.4. APPLICATIONS

L'écoulement d'un courant transitoire intense par une prise de terre peut donc faire apparaître deux types de phénomènes :

- un accroissement de la montée en potentiel de la prise de terre au-delà du produit du courant écoulé par la résistance de terre. Cet effet, dû à la self-inductance des conducteurs de terre, joue d'autant plus que les variations du courant sont rapides, que la prise de terre est étendue et que la résistivité du sol est faible.

  Pour en réduire l'importance, il faut multiplier le nombre des conducteurs de terre directement reliés au point où le courant transitoire pénètre dans la prise de terre, ce qui conduit par exemple à préférer, à résistance de terre égale en basses fréquences, une prise de terre formée de plusieurs brins rayonnants à celle qui serait constituée d'un seul conducteur enfoui rectilignement.

- Une réduction de la valeur maximale de la montée en potentiel de la prise de terre, due à des claquages dans le sol au voisinage des conducteurs de terre. Cet effet joue d'autant plus que l'amplitude du courant est grande, que l'étendue de la prise de terre est petite et que la résistivité du sol est grande.

Pour évaluer l'effet réducteur des claquages, on peut utiliser l'une des méthodes citées plus haut, tout en gardant à l'esprit que le résultat ne peut être que très approché, d'une part à cause des simplifications utilisées dans les dites méthodes, d'autre part parce qu'on ignore généralement la valeur exacte des paramètres caractérisant les phénomènes de claquage dans le sol (en particulier le champ critique E_c).

L'importance qu'il faut accorder aux effets de la self-inductance des conducteurs de terre dépend de l'application visée : spectre des courants transitoires à écouler, amplitude des surtensions admissibles, hauteur des structures conductrices aériennes (par exemple : pylône) conduisant le courant à écouler depuis un élément « sensible » jusqu'à la prise de terre... A titre d'exemple, on a reproduit en figure 24 un schéma indiquant la manière de réaliser les améliorations de terre des pylônes de ligne aérienne à 400 kV.

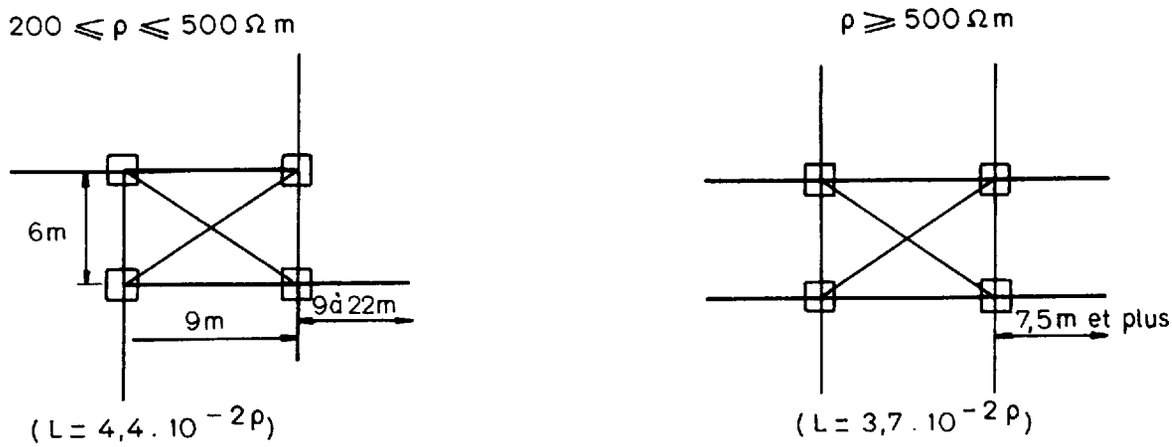


Figure 24 - **Mises à la terre supplémentaires pour des pylônes THT.**

BIBLIOGRAPHIE

[1] - B. HUTZLER
Etude de la réponse d'une prise de terre soumise à un courant de foudre : étude bibliographique. Note HM/72 - 2609 du 4/9/1973.

[2] - A.J. ERIKSSON
Notes on impulse impedance characteristics of earth electrodes. CSIR Special report ELEK 164 (january 1979).

[3] - C. GARY
L'amorçage en retour (Extrait de la troisième partie d'un ouvrage sur les lignes à THT). A paraître prochainement dans la collection des ETUDES ET RECHERCHES (Eyrolles).

[4] - K. BERGER, R.B. ANDERSON, H. KRONINGER
Les paramètres des coups de foudre. Electra N° 41 (juillet 1975) pp. 23-37.

[5] - R.B. ANDERSON, A.J. ERIKSSON
Les paramètres de foudre en vue des applications industrielles. Electra N° 69 (mars 1980) pp. 65-102.

[6] - P. KOUTEYNIKOFF
Réponse impulsionnelle des prises de terre aux courants de foudre. Note HM/72 - 4529 du 5/3/1981 et papier 121-03 présenté au Symposium GIGRE 22-81, Stockholm (juin 1981).

[7] - P. KOUTEYNIKOFF
Modèle pour le calcul de l'impédance d'une prise de terre longue aux basses et aux hautes fréquences - Note HM/72 - 4670 du 13/1/1982.

[8] - A.C. LIEW., M. DARVENIZA
Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. Proc. IEE, Vol 121, N° 2 (february 1974) pp. 123-135.

[9] - R. KOSZTALUK
Comportement des prises de terre en béton armé sous l'effet des courants de foudre.
Papier R. 3.8 présenté à la 14ème Conférence Européenne sur la protection contre la foudre, GDANSK (juin 1978).

[10] - F. POPOLANSKY
Generalization of model measurement results of impulse characteristics of concentrated earths.
Papier SC 33-80 (WG 01) 19 IWD (août 1980).

5. ELEMENTS D'INFORMATION CONCERNANT LES TENSIONS DE PAS ET DE CONTACT (TOUCHER)

Le fait de toucher un objet relié à une prise de terre ou de se trouver à proximité de celle-ci, au moment précis où elle écoule un courant de défaut, peut, dans certaines conditions, constituer un risque.

La probabilité d'un choc électrique ne peut que résulter de la concomittance d'événements aléatoires indépendants : présence d'un défaut, présence humaine ou animale, différence de potentiel telle qu'elle donne naissance à un courant électrique circulant à travers le corps.

Le risque d'électrocution est lié non à la valeur de l'élévation du potentiel de terre mais au courant traversant le corps. Les principaux paramètres à considérer sont notamment :

- l'amplitude et la durée d'application du courant
- le trajet suivi par le courant, donc les points d'application de la tension
- la valeur des impédances rencontrées.

5.1. DEFINITIONS

A défaut de définitions CEI, on peut adopter celles que propose le Projet de Guide IEEE 81 [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.

Tension de contact (ou de toucher)

La tension de contact est la différence de potentiel entre une structure métallique mise à la terre et un point à la surface du sol à une distance égale à la distance horizontale maximale normale que l'on peut atteindre, soit approximativement 1 mètre.

Les figures (a) et (b) définissent respectivement de la façon la plus simple possible la tension de pas et la tension de contact.

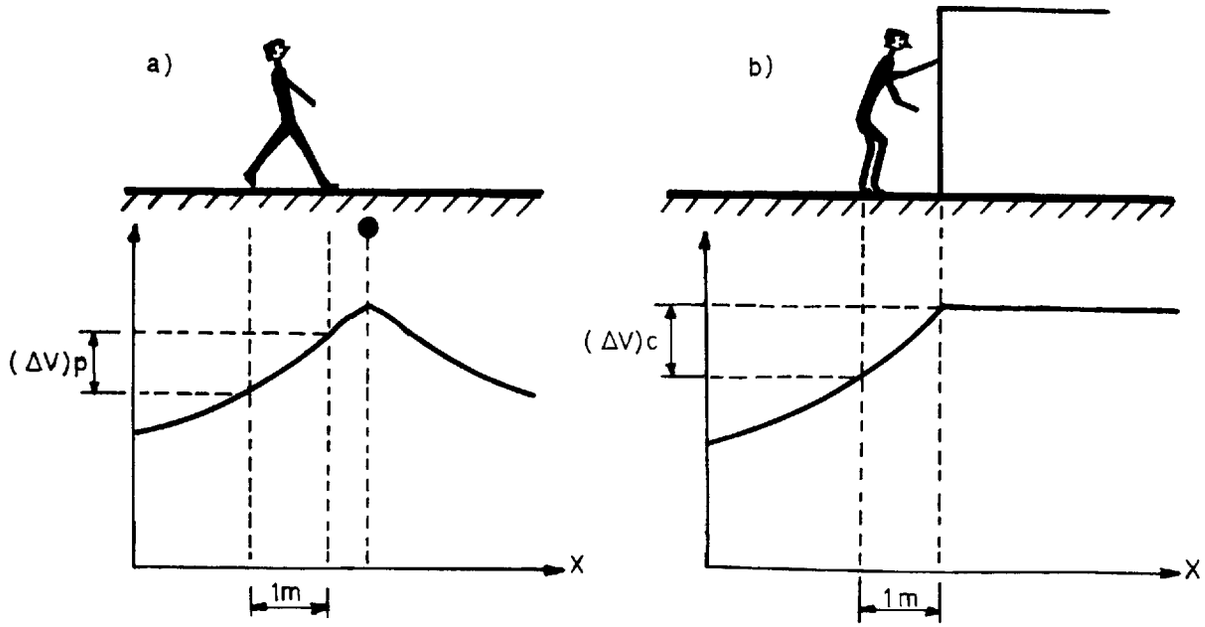


Figure 25 a) **Potentiel du sol V et tension de pas $(\Delta V)_p$ près d'un conducteur enfoui écoulant un courant.**

b) **Potentiel du sol V et tension de contact $(\Delta V)_c$ près d'une structure métallique écoulant un courant.**

5.2. EFFETS DU COURANT SUR LE CORPS HUMAIN

Le danger d'électrocution est déterminé par le passage du courant à travers le corps.

On distingue les seuils de perception, de « non lâcher » (au-delà de certaines valeurs du courant, certains muscles se contractent et le sujet ne peut plus lâcher le conducteur), de danger (figure 28).

La littérature, abondante sur ce sujet, montre la difficulté qu'il y aurait à attribuer une valeur pour chacun de ces seuils et on doit se contenter de valeurs probables, obtenues dans des conditions définies : par exemple le seuil de perception du courant varie dans un rapport 100 entre deux organes comme l'oeil humain et la main.

Pour se fixer un ordre de grandeur raisonnable, on pourra faire appel aux courbes publiées dans la littérature (courbes de Dalziel, Lee, Biegelmeir) [2] à [7], Folliot [9]. Par ailleurs, il conviendra de respecter la courbe tension/temps donnée dans la norme NF C 15-100 (Fig 41 B).

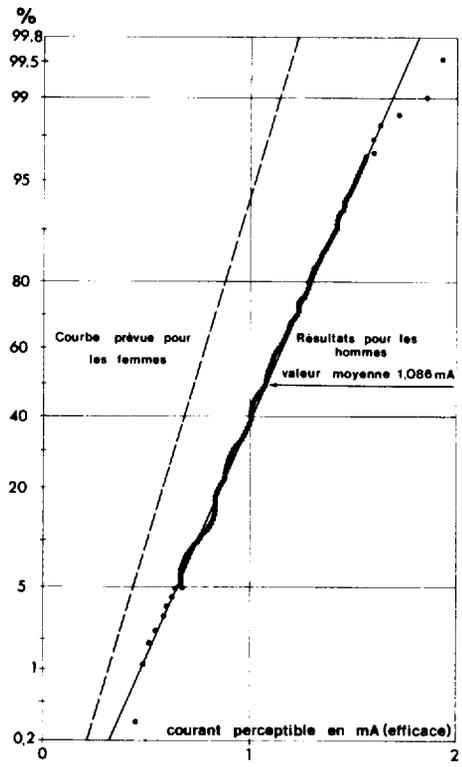


Figure 26* - **Seuil de perception du courant (d'après Dalziel).**

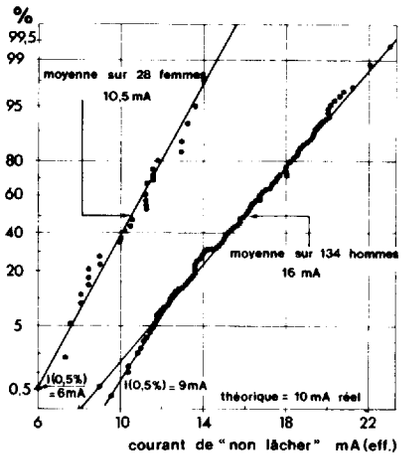


Figure 27* - **Seuil de courant de « non lâcher » (d'après Dalziel).**

* In Revue Générale de l'Electricité, n° 10, octobre 1981, p. 708, 710.

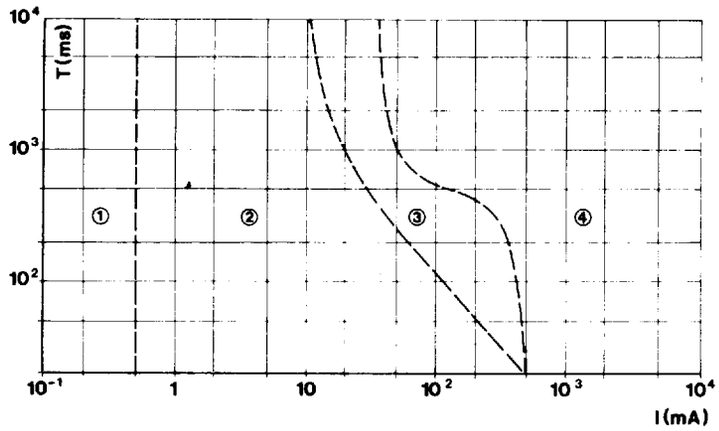


Figure 28* - **Zones des effets physiologiques en fonction du temps de passage du courant électrique alternatif 50 - 60 Hz (d'après la CEI).**

1 : Habituellement aucune réaction.
2 : Habituellement aucun effet physiopathologique dangereux.
3 : Effets physiopathologiques non mortels, habituellement réversibles, augmentant avec l'intensité du courant et le temps, tels que contractions musculaires au-dessus des valeurs de « non lâcher », difficultés de respiration, augmentation de la pression sanguine, perturbations dans la formation et la propagation des impulsions dans le coeur, y compris la fibrillation auriculaire et des arrêts temporaires du coeur sans fibrillation ventriculaire.
4 : Fibrillation ventriculaire probable, les effets physiopathologiques augmentant avec l'intensité du courant et le temps tels qu'arrêt du coeur, arrêt de la respiration et brûlures graves.

Au-delà de certaines valeurs de courant il existe des risques considérables qui peuvent être l'arrêt respiratoire, l'arrêt cardiaque, par fibrillation ventriculaire, ou des brûlures.

Plusieurs facteurs sont à considérer pour apprécier le risque encouru : en dehors du facteur temps, le courant est une fonction de la tension appliquée et de l'impédance du trajet suivi par le courant. Nous n'insisterons pas ici sur l'influence que peut jouer la fréquence, mais elle constitue aussi un critère important à prendre en compte dans la mesure où les courants de défaut peuvent être à la fréquence industrielle 50 Hz et également de foudre (plusieurs kilohertz).

La protection des êtres humains est assurée dans la mesure où le couple courant-durée reste en deça de limites définies dans la littérature.

5.3. RESISTANCE DU TRAJET ELECTRIQUE

On distingue deux configurations correspondant aux tensions de pas ou de toucher. On a vu que le problème fondamental est la détermination du courant traversant le corps ce qui nécessite la connaissance de l'impédance du trajet du courant entre les points d'applications de la ddp.

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

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

* In Revue Générale de l'Electricité, n° 10, octobre 1981, p. 708, 710.

5.3.1. **Résistance du corps humain**

Elle comprend deux termes : la résistance interne, et la résistance de la peau.

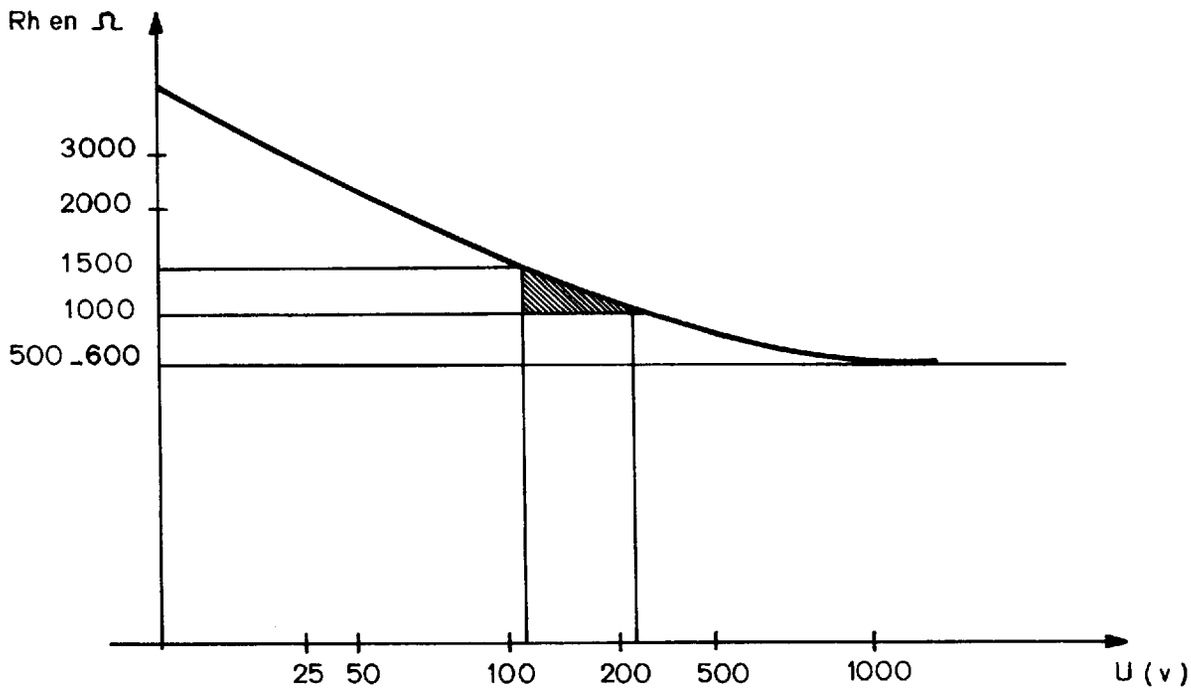
La résistance interne est relativement constante et peut être évaluée à environ 500 ou 600 Ω.

La résistance de la peau est éminemment variable : elle dépend
- de l'état du revêtement de la peau
- de l'état d'hydratation
- de l'attention du sujet
- de la tension appliquée

Au fur et à mesure que la tension s'élève le pouvoir protecteur de la peau diminue (percement).

Le facteur tension a pour effet, à partir de 1 000 volts, de déterminer une rupture diélectrique du revêtement cutané. La résistance du corps est alors réduite à celle du milieu interne (environ 500 à 600 Ω).

Ce phénomène est traduit par la courbe ci-dessous de la résistance du corps (résistance interne + résistance de la peau) en fonction de la tension appliquée.



Tension (v)	Rh (Ω)
25	2500
50	2000
127	1500
250	1000
Valeur asymptotique	500_600

Figure 29 - **Variations de la résistance du corps humain en fonction de la différence de potentiel appliquée.**

Pour une tension donnée, la résistance du corps est d'autant plus faible que

- la surface de contact est plus grande
- la pression de contact est plus forte : la résistance est plus faible pour une pièce saisie que pour une pièce touchée.

La peau présente une capacité d'autant plus importante qu'elle est plus sèche, en série avec la résistance du corps humain ; cette capacité claque pour quelques dizaines de volts seulement.

En résumé, il faut insister sur la nature essentiellement variable présentée par le trajet du courant car il dépend des matériaux rencontrés, de conditions d'humidité,...., et de plus au dessus de certain niveau, il peut y avoir claquage.

On admet qu'une résistance de 1 000 Ω constitue une assez bonne approximation pour la résistance moyenne du corps [4].

5.3.2. Résistance présentée par les chaussures

La résistance d'une chaussure est extrêmement variable et dépend notamment des matériaux utilisés dans sa fabrication et de son usure. Elle est évidemment plus basse lorsqu'une chaussure est détrempée que lorsqu'elle est sèche. On peut retenir les deux ordres de grandeurs suivants :

- plusieurs kiloohms pour une chaussure usée et détrempée.
- plusieurs mégohms pour une chaussure sèche en bon état.

La tension de claquage diélectrique des semelles peut descendre à des valeurs aussi basses que quelques kilovolts.

5.3.3. Résistance de terre des pieds

Un pied posé sur le sol est assimilable à une plaque circulaire d'un rayon voisin de 10 cm. Sa résistance de terre s'exprime donc, en fonction de la résistivité ρ du sol, par la formule approchée :

$$R = 2{,}5\,\rho \quad (\rho \text{ en } \Omega\text{m})$$

5.4. CALCUL DU COURANT DERIVE

Le courant dérivé est égal au rapport ΔU, entre les points de contact, et la somme des résistances rencontrées sur le trajet du courant ;

$$I = \frac{\Delta U}{\Sigma R_i} = \frac{\Delta U}{R_{corps} + R_{chaussures} + R_{pieds}}$$

ΔU est, selon le cas, soit la tension de pas soit la tension de contact.

5.4.1. Tension de pas

ΔU étant la tension de pas, on a alors

ΣR_i = résistance du contact + 2 (résistance de la chaussure) + R_{terre} des 2 pieds + R_{corps}.

Tension de pas

- Résistance du corps : voir 5.3.1.
- Résistance des chaussures : voir 5.3.2. Les résistances des deux chaussures s'additionnent.
- Résistance des pieds.

Lors d'un pas, les deux pieds ne sont jamais simultanément complètement posés sur le sol, aussi peut-on prendre :

$$R_{pieds} \approx 6\ \rho$$

La tension de pas se déduit immédiatement de cette valeur.

5.4.2. **Tension de contact**

ΔU étant la tension de contact
ΣRi = résistance contact + (résistance de la chaussure) + résistance pied + résistance corps

- Résistance du corps : voir 5.3.1.
- Résistance des chaussures : voir 5.3.2. Cette fois-ci, les résistances des deux chaussures doivent être considérées comme étant en parallèle.
- Résistance des pieds.

A cause de l'interaction entre les deux pieds, la résistance de terre de deux pieds en parallèle est légèrement supérieure à la moitié de la résistance de chaque pied :

$$R_{pieds} \approx 1{,}5\ \rho$$

D'où on déduit la tension de contact

BIBLIOGRAPHIE

[1] - IEEE Standard 81 : Recommended guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth (1980).

[2] - J. CABANES
Nature des effets physiologiques du courant électrique. RGE, n° 10 (octobre 1981) pp. 707-711.

[3] - C.F. DALZIEL. W.R. LEE
Lethal electric currents. IEEE Spectrum (feb. 1969).

[4] - CEI Publication 479 : Effets du courant passant par le corps humain.

[5] - G. BIEGELMEIER, W.R. LEE
New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for a.c. shoks at 50-60 Hz. IEE Proc. Vol 127, n° 2 Pt A (march 1980) pp. 103-110.

[6] - IEEE Standard 80-1976
Guide for safety in substation grounding.

[7] - J.G. SVERAK, W.K. DICK, T.H. DOPPS, R.H. HEPPE
Safe substation grounding, Part 1. IEEE Trans. on PAS, vol PAS-100, n° 9 (sept. 1981) pp. 4281-4290.

[8] - La sécurité électrique en milieu domestique - Vigilance, n° 54 (sept. 1976) pp. 31-43.

[9] - D. FOLLIOT, Les accidents d'origine électrique - Leur prévention (Masson) (1982)

[10] - NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension : Règles.

6. APPLICATION - NOTIONS SUR LA CONCEPTION ET LA REALISATION DES RESEAUX DE TERRE

6.1. OBJECTIFS DE LA CONCEPTION DES RESEAUX DE TERRE

Il n'est pas inutile de rappeler, lors de la conception des réseaux de terre, quels sont les objectifs prioritaires.

Ils portent essentiellement sur la sécurité par :

- la protection des personnes
- la protection des matériels, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'installation

Un réseau de terre a également comme mission la réduction des perturbations sur les équipements électriques ou électroniques sensibles.

6.2. CONCEPTION ET REALISATION PRATIQUE DES RESEAUX DE TERRE DES POSTES ET CENTRALES

6.2.1. Objectifs et contraintes à respecter

La base de toute protection contre les surtensions est le réseau de terre équipotentiel ; ce terme est à prendre au sens large, le réseau de terre idéal étant une surface très conductrice en tous points dont la tension serait nulle par rapport au sol lointain. Ce modèle n'étant que théorique, il faut essayer de créer, sur les sites à protéger, un réseau de terre qui soit équipotentiel tout en restant dans des conditions économiques acceptables.

La disproportion des tensions de tenue au choc des différents matériels installés sur un site fait qu'une surtension résiduelle, qui peut être supportée sans risque par une installation à courant fort, devient extrêmement dangereuse pour les installations électroniques. Il est donc nécessaire d'éviter, dans toute la mesure du possible, les interactions d'une installation sur une autre. Aussi, la protection d'ensemble contre les surtensions doit-elle respecter les principes de base suivants :

a) éviter, par l'installation judicieuse de paratonnerres, que la foudre puisse atteindre directement un élément d'installation ;

b) éviter les phénomènes d'induction par les conducteurs de descente des paratonnerres ;

c) éviter la transmission de surtensions par induction entre circuits de nature différente, en effectuant la séparation de ces circuits, leur mise sous écran, et en réalisant des jonctions nombreuses des écrans des câbles au réseau équipotentiel de terre ;

d) réduire l'amplitude des surtensions à partir de leur point d'origine, partout où il est possible de s'en protéger de manière à les empêcher d'atteindre les installations électroniques les plus fragiles avec une amplitude et une durée dangereuses ;

e) établir, pour chaque installation (ou groupe d'installations) séparée des autres, un réseau de terre ayant une impédance assurant la meilleure équipotentialité possible de tous les éléments, quelle que soit la nature du courant à écouler ;

f) interconnecter les réseaux de terre locaux afin de réaliser un vaste réseau de terre qui soit aussi équipotentiel que possible tant pour l'écoulement des courants de défaut à 50 Hz que pour celui des courants à hautes fréquences et des courants de choc, étant entendu que l'équipotentialité s'entend comme l'impossibilité d'apparition d'une différence de potentiel gênante entre deux éléments voisins de l'installation ;

g) permettre la limitation des tensions de pas et de toucher (sécurité vis-à-vis du personnel).

Un réseau de terre doit être capable d'écouler les divers courants ; il doit donc être établi en conséquence. Il convient de noter enfin, que l'interconnexion de la totalité des réseaux de terre locaux afin de constituer un réseau équipotentiel de terre, est d'autant plus nécessaire que la résistivité du terrain sur lequel sont implantées les diverses installations est plus élevée, c'est-à-dire d'autant plus nécessaire qu'il est difficile de réaliser de bons réseaux de terre.

6.2.2. **Adaptation des réseaux de terre aux types de terrain**

La nature du terrain conditionne le mode de réalisation des réseaux de terre tant par sa structure physique qui détermine le type des électrodes à employer, que par sa résistivité qui détermine leur dimensionnement (étendue, profondeur d'enfouissement).

Il est donc nécessaire d'effectuer, avant de définir la géométrie et les dimensions à donner aux réseaux de terre, des mesures de résistivité de sol, et sur échantillon, pour vérifier les variations de la résistivité de ce sol dans le temps. On réalisera un réseau de terre de surface dont les conducteurs seront placés en tranchée.

La profondeur d'enfouissement sera limitée dans certains cas par la présence à faible profondeur de couches dures ou simplement de résistivité beaucoup plus grande que celle des couches de surface. Dans d'autres cas, la résistivité des couches de surface étant plus élevée, soit d'une manière permanente, soit en période de sécheresse ou de gel, que celles des couches immédiatement inférieures, une profondeur plus grande sera recherchée. La mise en place d'un conducteur unique de très grande longueur dans le but de recherche d'une zone de terrain de plus faible résistivité, est à proscrire, ce conducteur ayant une impédance d'onde non négligeable qui réduirait son efficacité pour l'écoulement des courants HF et plus encore pour l'écoulement des courants de foudre.

Il est nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité du sol en surface et en profondeur, ce qui est relativement facile à partir des mesures de résistivité. Il convient surtout de tenir compte des variations saisonnières de la résistivité du sol car le but recherché est d'obtenir un réseau de terre qui joue pleinement son rôle dans les périodes les plus défavorables (étude du comportement électrique du sol en fonction de l'humidité).

6.2.3. **Tracé du réseau de terre**

Un câble continu entoure le périmètre de l'installation pour éviter l'apparition des gradients importants. On dispose ensuite, à l'intérieur de l'enceinte, des câbles en lignes parallèles et de préférence espacés d'une distance constante de façon à améliorer la répartition de potentiel en surface pour réduire les tensions de pas et de toucher. Ces lignes pourront se situer à l'aplomb des appareils et des structures métalliques qui seront implantés par la suite de façon à faciliter la mise à la terre des connexions (figure 30).

Les connexions des câbles entre eux, aux points de croisement et celles entre les câbles et les masses mécaniques des appareils et des structures métalliques seront réalisées par procédé métallurgique. Les masses mécaniques des appareils seront reliées au réseau de terre par au moins deux dérivations en T diamètralement opposées sur l'appareil : les liaisons seront les plus courtes possibles.

Ces travaux seront réalisés avant le remblayage de l'enceinte s'il était nécessaire et avant l'installation des pistes lourdes et des bâtiments de relayage et de commande afin que tous les câbles de terre soient enterrés dans la terre naturelle du lieu et qu'ils soient en mesure de remplir pleinement leur fonction. Les câbles enterrés constitueront un maillage autour de chaque bâtiment intérieur à l'enceinte (bâtiments de relayages et de commande des postes et des centrales, réacteurs des centrales nucléaires). Le ceinturage à fond de fouille des bâtiments n'est pas recommandé, car étant plus ou moins noyé dans un béton peu conducteur, il participe peu à l'évacuation à l'intérieur du sol, des courants de défaut. Dans tous les cas, on prévoira un nombre suffisant de pénétrations entre le réseau enterré et les bâtiments de façon à assurer un nombre important de liaisons entre les collecteurs de terre des bâtiments et le réseau enterré. Ces pénétrations maintiendront l'équipotentialité du circuit de mise à la terre. Les différents bâtiments seront ensuite interconnectés les uns aux autres par plusieurs liaisons enterrées afin qu'aucun d'entre eux ne soit en antenne. Il en sera de même pour les pylônes situés dans l'enceinte de l'installation ou à ses abords immédiats qui seront reliés au réseau général de terre par des liaisons brasées par procédé aluminothermique à chacun de leurs pieds.

Nota : Une attention particulière doit être apportée à la mise à la terre des clôtures métalliques, afin d'éviter l'apparition d'éventuelles tensions de contact dangereuses.

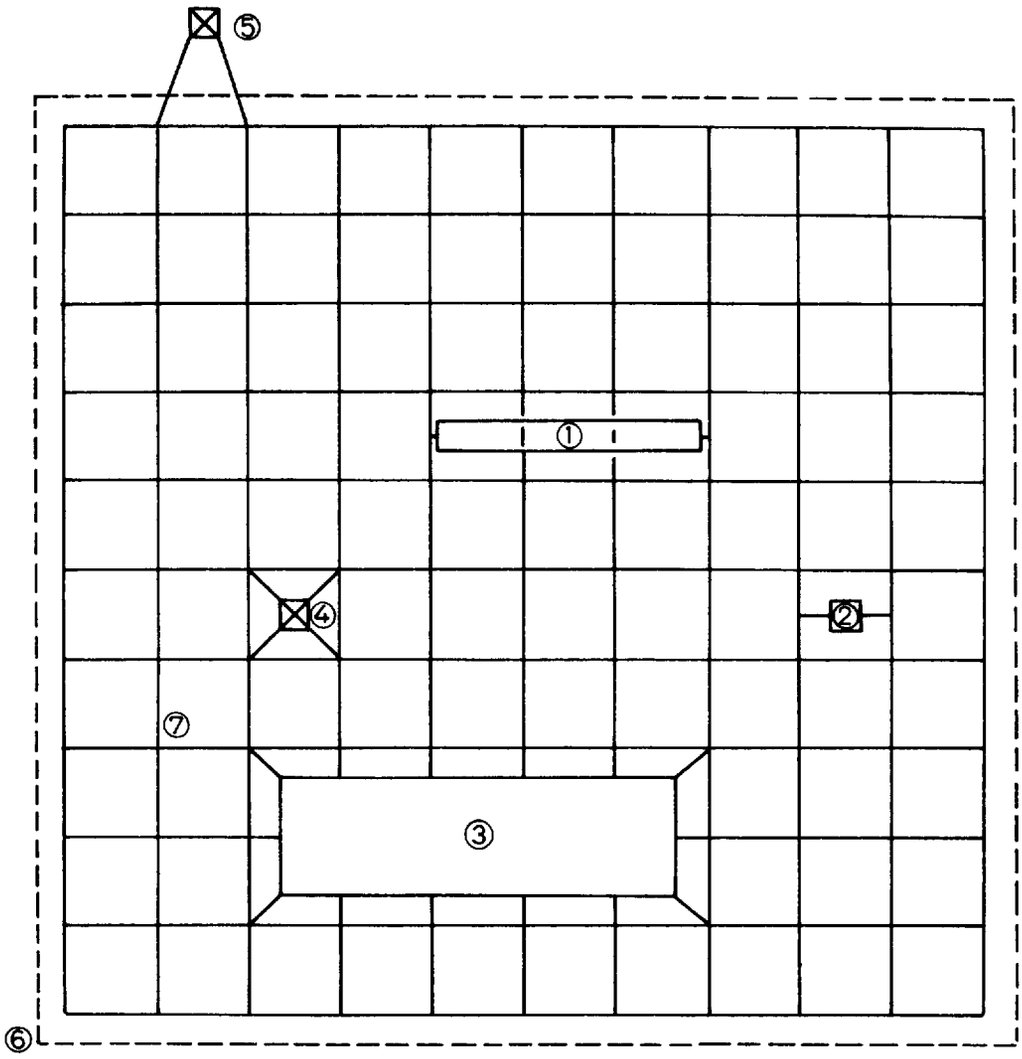


Figure 30 : **Schéma de principe de réalisation d'un réseau de terre équipotentiel.**

Légende :

(1) - Structure métallique (portique)
(2) - Mise à la terre d'un appareil
(3) - Bâtiment
(4) - Pylône HT intérieur à l'enceinte
(5) - Pylône HT ou support MT situé dans le voisinage de l'enceinte
(6) - Clôture
(7) - Connexion, entre conducteurs de terre, réalisée par brasage

6.2.4. **Choix des matériels**

Les matériels à utiliser dépendent des caractéristiques de terrain, des risques de corrosion et de l'amplitude des courants de défauts à écouler. Le choix des éléments constitutifs est déterminé par :

- la configuration du réseau de terre,
- les caractéristiques du sol dans lequel il sera installé.

Il est nécessaire de considérer aussi les qualités intrinsèques des matériels à utiliser : résistance mécanique suffisante, qualité des alliages en présence de métaux différents entraînant des risques de corrosion, facilité de mise en oeuvre.

Conducteurs longs enfouis en tranchée

Ces conducteurs peuvent être des barres, des câbles ou des fils massifs. Ils doivent toujours être un métal nu et en contact direct sur toute leur longueur avec la terre naturelle du lieu.

A section égale, un conducteur massif doit être utilisé de préférence à un câble, les brins constituant celui-ci se détruisant plus vite qu'un conducteur à âme pleine. Pour cette raison, l'emploi de tresse souple comme conducteur de terre enterré est à proscrire.

Piquets de terre

Les piquets à utiliser devront pouvoir être enfoncés par percussion même dans des terrains de pénétration difficile. Les piquets devront donc posséder une bonne résistance mécanique ce qui élimine l'emploi de piquets creux. Comme la section du conducteur joue peu sur l'abaissement de sa résistance de terre, on adoptera, pour des raisons de mise en place et de coût, le diamètre minimum de 16 mm.

La tenue des manchons d'accouplement des piquets doit être parfaite aussi bien mécaniquement qu'électriquement ; cela exclut par conséquent :

- l'utilisation de manchons vissés sur les tiges à réunir, les filets des vis d'extrémités se déformant au cours de l'enfoncement,
- l'emploi de piquets constitués par un chemisage de cuivre sur acier ; l'enveloppe extérieure, ne faisant pas corps avec l'âme, se déplace sur celle-ci au cours de l'enfoncement.

Le métal du conducteur ou des piquets devra être choisi en fonction de la corrosion dont les causes sont diverses : attaque chimique, biologique (anaérobique), par oxydation, par formation d'un couple électrolytique entre métaux différents ou entre un métal et les produits de son altération (rouille dans le cas du fer), par électrolyse, par les courants de circulation dans le sol (traction électrique), etc.

La corrosion est d'autant plus active que le sol contient à la fois de l'humidité et des sels donnant des solutions électrolytiques fortement ionisées conférant au sol une certaine acidité dite « agressivité ». Les métaux les moins attaqués sont les métaux les plus électropositifs.

En pratique, les métaux à utiliser sont le cuivre et les aciers inoxydables qui résistent à la corrosion par « passivation ». Il faut y ajouter le fer pur qui convient bien dans les sols neutres ou faiblement acides (fer electrolytique, fer ARMCO, etc.)

On pourrait conclure que l'emploi du cuivre est toujours préférable. Il faut tenir compte cependant des inconvénients résultant de la formation d'un couple électrolytique cuivre-fer ou cuivre-plomb avec les structures métalliques voisines en contact avec le sol (pieds des pylônes, charpentes métalliques, câbles électriques sous gaines plomb), la corrosion étant alors reportée sur ces structures.

Dans certains terrains à teneur élevée en chlorures, l'emploi de conducteurs en fer pur et dans certains cas, en cuivre, est déconseillé (terrains en bordure de mer, proximité de marais à eaux saumâtres, emplacement d'anciens lacs salés, etc.). Il y aura lieu, dans ces cas particuliers, d'utiliser des conducteurs en acier inoxydable spéciaux adaptés aux caractéristiques du sol. Une étude particulière comportant une analyse physico-chimique poussée devra toujours être entreprise lorsqu'on se trouvera en présence de terrains de ce genre.

Il en sera de même pour les piquets qui pourront être utilisés en complément du réseau de terre de surface. Dans les terrains courants, des piquets cuivre-acier ou des piquets en acier inoxydable pourront être utilisés ; toutefois, les piquets en acier inoxydable, ayant des caractéristiques mécaniques supérieures, ont des possibilités d'enfoncement plus importantes. Dans les terrains dont il est fait mention ci-dessus, il conviendra d'utiliser des piquets en acier inoxydable de même alliage que celui choisi pour les conducteurs.

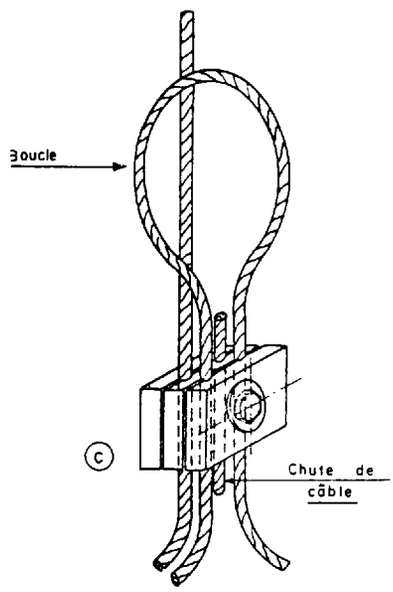
6.2.5. Procédés de raccordement des éléments enterrés des réseaux de terre

La qualité d'un réseau de terre équipotentiel dépend en grande partie, comme pour les circuits actifs d'une installation, de la qualité des jonctions des éléments constitutifs avec, en plus des qualités de tenue mécanique et de contact électrique indispensable, une bonne tenue à la corrosion.

De plus, un réseau de terre équipotentiel formant un tout, il ne faut pas qu'à un moment quelconque, on puisse occasionnellement, par simple démontage d'un collier, en modifier la configuration.

En tout point du réseau enterré, les raccordements mécaniques réalisés entre conducteurs de terre ainsi que les sabots de terre destinés au raccordement des conducteurs de terre sur les charpentes métalliques et les matériels installés en extérieur sont à éviter (transformateurs, appareils de coupure). Les sabots de terre présentent l'inconvénient de mettre le maillage en discontinuité hors du terrain naturel. Dans ce cas particulier, une dérivation en T assurée par brasage est beaucoup plus rationnelle ; cependant, pour des raisons de sécurité, il convient de réunir au moins deux éléments d'un même équipement métallique par une dérivation en T au réseau de terre équipotentiel.

Sabot de terre



1 Conducteur en transit

Les moyens actuels de raccordement à utiliser sont les suivants :

- pour les conducteurs de fer pur : la soudure électrique ou oxyacétylénique avec un métal d'apport approprié.
- pour les conducteurs en cuivre, en fer pur et pour le raccordement de ces conducteurs sur les piquets enfoncés par percussion : la brasure par procédé aluminothermique (procédé CADWELD ou BURNDYWELD). L'emploi de ce procédé très pratique nécessite le respect d'un certain nombre de précautions :
  - . avoir des moules de configuration et de dimensions rigoureusement adaptés aux dimensions des éléments à raccorder,
  - . utiliser le type de charge recommandé par le fabricant,
  - . tenir les moules à l'abri de l'humidité,
  - . bien décaper et bien sécher les conducteurs avant emploi.

Remarque :
Lorsque sur des terrains rocheux, on est amené à utiliser des piquets courts ayant également un rôle de maintien en place des conducteurs du réseau de terre du fait de la faible épaisseur de terre recouvrant ceux-ci, le maintien du conducteur sur le piquet sera fait par coincement mécanique, sans coupure du conducteur ainsi fixé et raccordé.

6.3. MISE A LA TERRE DES EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES ET DES CABLES DE LIAISON

6.3.1. Principes généraux

Les réseaux de terre de tous les bâtiments qui se trouvent à l'intérieur de l'enceinte d'une installation industrielle quelconque doivent être réunis au réseau de terre de l'installation pour former un réseau équipotentiel unique (y compris les fers à béton, liés ou soudés entre eux et toutes les carcasses métalliques, d'armoires, pompes, électrovannes, alternateur, etc.).

Ce n'est pas la valeur absolue du potentiel transitoire que peut prendre l'ensemble des installations toutes réunies au réseau équipotentiel de terre qui a de l'importance, mais seulement l'apparition des deux potentiels transitoires différents dans un même élément de l'installation.

En effet, si deux prises de terre peuvent être considérées comme séparées physiquement, elles sont toujours plus ou moins couplées électriquement ; elles ne sont donc nullement indépendantes et elles tendent, par conséquent, à favoriser l'apparition de potentiels transitoires dangereux pour les matériels sensibles, en particulier les matériels électroniques.

6.3.2. Bâtis, châssis et enveloppes métalliques

Les liaisons des divers équipements au réseau de terre doivent être les plus courtes possibles pour minimiser les impédances de raccordement en haute fréquence.

La mise à la terre des châssis des armoires doit être effectuée également par la connexion la plus courte possible au réseau équipotentiel général, ce qui exclut une liaison en étoile jusqu'à un puits de terre particulier.

La liaison entre deux armoires contiguës doit être réalisée par une tresse de masse de forte section la plus courte possible et boulonnée entre les 2 châssis. Ce point appelé aussi « masse mécanique »* sera réuni au réseau équipotentiel de terre.

La liaison entre armoires jointives réalisée à partir des caniveaux où passe le conducteur de terre augmenterait la longueur des connexions et donc leur impédance, surtout pour les circuits digitaux (voir figure 31).

Les châssis étant réunis au plus près au réseau équipotentiel, il n'est pas nécessaire de les isoler.

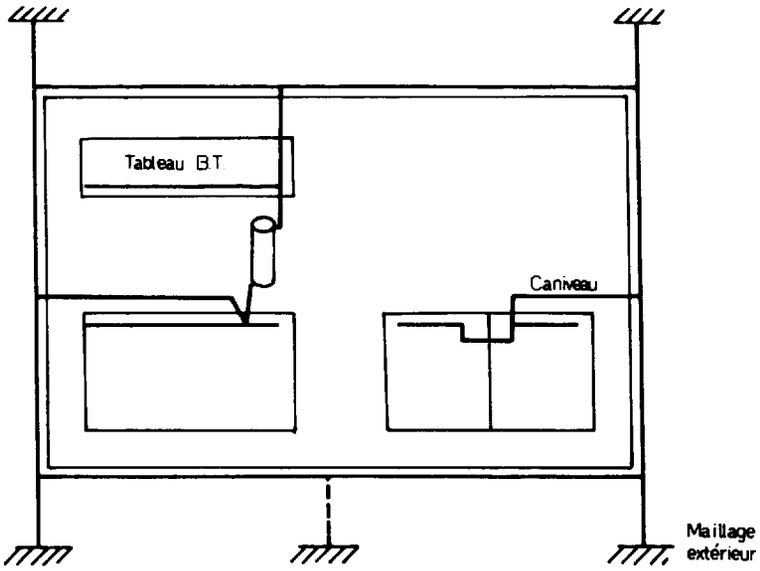


Figure 31 - **Principe de réalisation et de raccordement des collecteurs de terre à l'intérieur d'un bâtiment (poste MT/BT, bâtiment de relayage,...)**

* Voir la définition dans le document « Perturbations électriques et électromagnétiques des circuits basse tension des Postes et Centrales -Electricité de France- janv. 1980.

6.3.3. Mise à la terre de l'alimentation alternative (Figure 32)

Le collecteur de terre du tableau basse tension est relié par brasage par la connexion la plus courte possible à l'écran du câble d'alimentation (HN 33-S-34) dans lequel se trouvent la phase et le neutre.

L'autre extrémité de l'écran du câble d'alimentation est réunie à la masse mécanique du châssis de l'armoire électronique.

6.3.4. Référence de potentiel des circuits électroniques (Masse électronique)

Lorsque la référence de potentiel n'est pas isolée, elle doit être réunie par la connexion la plus courte possible au réseau équipotentiel général, ce qui exclut une liaison en étoile jusqu'à un puits de terre particulier.

La disposition la plus pratique consiste à réunir la référence de potentiel à la borne de mise à la masse mécanique du châssis par une connexion courte et par l'intermédiaire d'une barrette, ce qui permet d'effectuer des mesures d'isolement et de susceptibilité en ouvrant la barrette.

6.3.5. Procédés de mise à la terre des écrans des câbles

6.3.5.1. Introduction

La mise à la terre de l'écran à une extrémité protège les conducteurs des perturbations BF alors que la mise à la terre de l'écran aux deux extrémités protège les conducteurs des perturbations HF.

D'autre part, la mise à la terre de l'écran aux deux extrémités entraîne la circulation d'un courant dans l'écran qui doit être dimensionné en conséquence. La mise à la terre de l'écran à une seule extrémité peut entraîner une différence de potentiel importante entre la terre et l'autre extrémité et provoquer de ce fait un claquage.

L'écran d'un câble a pour but de protéger les conducteurs internes contre les perturbations électromagnétiques d'origine externe. Si on suppose que cet écran est homogène et de résistivité nulle et si on néglige les effets d'extrémité, la protection est théoriquement parfaite lorsque l'écran est mis à la terre aux deux extrémités.

- Le champ électrique à l'intérieur de l'écran est nul, donc les conducteurs internes ne sont soumis à aucune influence quel que soit le champ électrique extérieur.
- La mutuelle inductance par rapport à un conducteur extérieur est identique pour l'écran et pour chaque conducteur intérieur : le passage d'un courant variable dans un conducteur extérieur au câble n'induit aucune tension entre l'écran et les conducteurs internes.
- Le passage d'un courant dans l'écran, sous réserve que les filets de courant soient parallèles à l'axe du câble et que la densité de courant sur une section droite soit répartie symétriquement, n'engendre aucun champ magnétique à l'intérieur ; comme précédemment, aucune tension n'est induite entre les conducteurs internes et l'écran.

Un écran homogène et de résistivité nulle assure la protection totale des conducteurs internes contre les perturbations électromagnétiques externes ; si la tension entre un conducteur et l'écran est nulle à une extrémité (conducteur relié à l'écran), cette tension reste nulle en tout point du câble ; si un conducteur est isolé de l'écran à ses deux extrémités et non raccordé à un circuit extérieur, il prend en tout point, par capacité, le même potentiel que l'écran. Il en est de même pour tous les conducteurs d'un même câble, si bien que les tensions entre conducteurs sont également nulles.

Il existe une Norme, interne à l'Etablissement, référencée HN 33-S-34, qui porte sur les Câbles Basse Tension protégés contre les perturbations électromagnétiques.

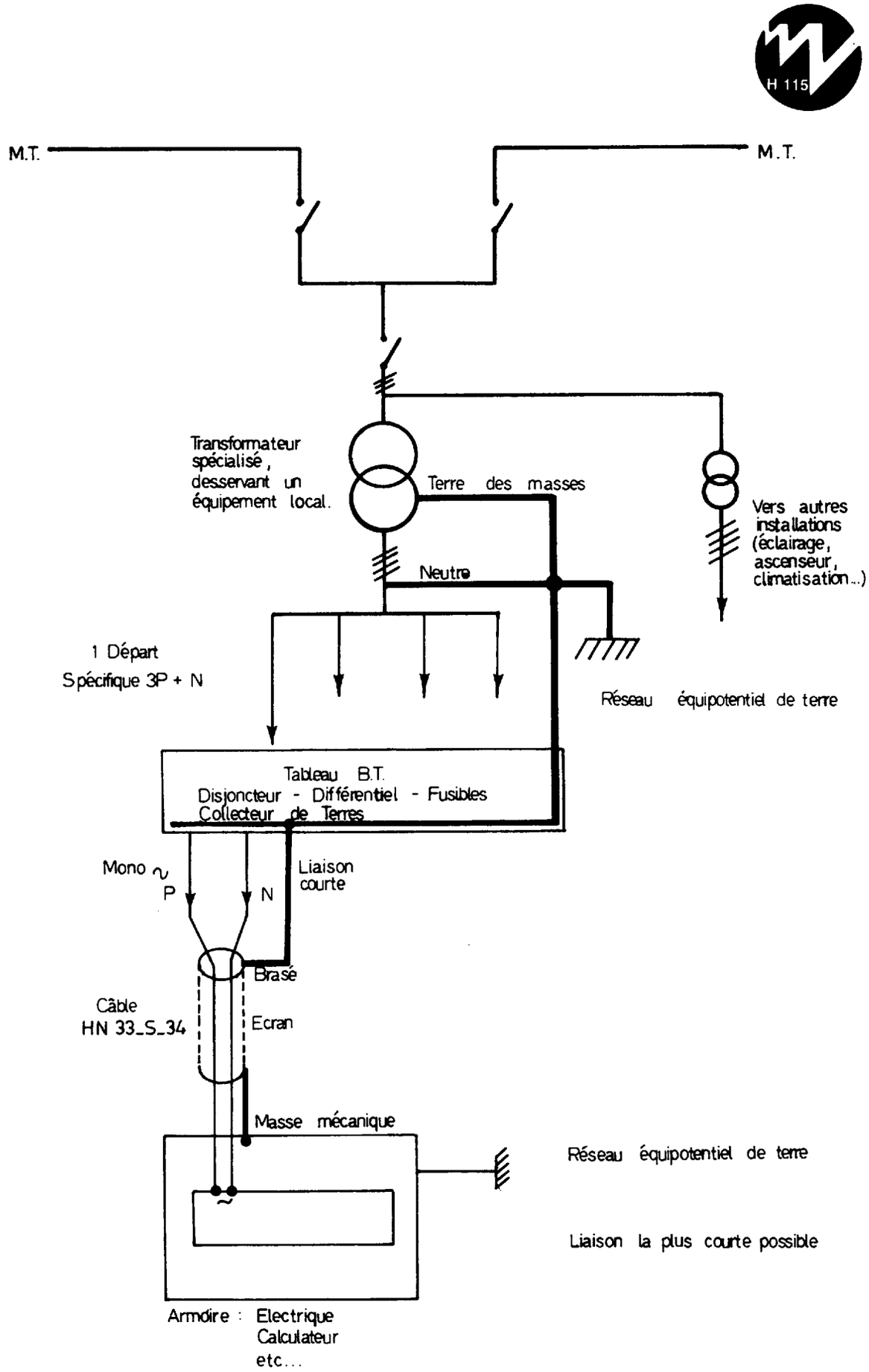


Figure 32 - **Schéma d'alimentation monophasée d'une armoire de relayage ou d'un calculateur.**

6.3.5.2. **Mise à la terre aux deux extrémités**

Lorsque la différence de potentiel entre les terres situées aux extrémités du câble est suffisamment faible (cas des réseaux équipotentiels de terre), la mise à la terre de l'écran à ses deux extrémités permet, puisque la tension HF entre conducteurs et écran est nulle au départ du câble, d'annuler également la tension HF entre ces conducteurs et la terre à l'autre extrémité. C'est le cas, par exemple, du câble reliant les bornes S_1 – S_2 d'un réducteur de mesures aux équipements placés dans un bâtiment de relayage. A cette extrémité, l'écran est relié à la masse mécanique de la baie d'électronique.

Cette compensation de la différence de potentiel entre les terres (ou de la tension induite par le champ magnétique HF) provient de l'égalité entre l'inductance de l'écran et la mutuelle inductance entre l'écran et les conducteurs intérieurs : la tension longitudinale induite sur les conducteurs intérieurs est égale à la chute de tension le long de l'écran.

Pour que cette compensation puisse avoir lieu, il faut évidemment que l'écran soit mis à la terre à ses deux extrémités.

Dans le cas idéal d'un écran parfaitement conducteur, il est donc possible d'éliminer totalement les surtensions à hautes fréquences de mode commun, à condition :

1) Que les tensions entre écran et terre soient effectivement nulles, c'est-à-dire, que les connexions reliant l'écran à la terre soient très courtes, de forte section, et que les contacts soient de bonne qualité.

2) Que l'écran possède un maillage le plus serré possible et soit continu particulièrement dans les zones où le gradient de potentiel est le plus élevé, c'est-à-dire au voisinage des appareils à haute tension : les écrans des câbles raccordés à un appareil HT doivent pénétrer à l'intérieur du coffret de raccordement et être mis directement à la masse de ce coffret.

On peut craindre que les courants HF véhiculés par les écrans des câbles perturbent les circuits non protégés placés à proximité ; c'est le cas, en particulier, dans les bâtiments de relayage où seuls les câbles sont mis sous écran et non la filerie reliée aux équipements. Les courants HF dans les écrans des câbles peuvent être réduits à leur arrivée dans un bâtiment de relayage :

1) En mettant à la terre les écrans des câbles en différents points intermédiaires de leur parcours, ce qui a pour effet de dériver les courants HF ; en particulier les écrans doivent être mis à la terre chaque fois que le câble passe en relais dans une armoire ou un coffret.

2) En réduisant l'impédance HF des mises à la terre de l'appareillage à haute tension, ce qui permet de diminuer l'amplitude du courant HF injecté dans les écrans au départ des câbles.

3) En enfouissant les conducteurs du réseau de terre sous les caniveaux de manière à dériver une partie du courant HF empruntant les écrans des câbles.

4) En utilisant un système d'isolement galvanique à l'entrée de l'électronique (opto-coupleurs, transformateurs, etc.).

Remarquons que ces mesures ont également l'avantage de diminuer l'amplitude des courants à 50 Hz passant par les écrans en cas de court-circuit dans le poste. Dans le cas où des boucles sont inévitables, il est recommandé de les conserver internes au système.

Cas de la liaison entre deux baies d'électronique numériques

L'écran du câble d'information reliant les 2 baies sera réuni aux deux extrémités aux bornes de mise à la masse mécanique des baies.

En effet, les phénomènes à hautes fréquences sont prépondérants, les courants pouvant circuler dans l'écran du câble sont minimes dans une salle d'électronique et la surface des boucles de masse ainsi créées est faible.

6.3.5.3. **Mise à la terre à une seule extrémité**

Il s'agit des installations bas niveau pour lesquelles les deux extrémités de l'écran ne peuvent être raccordées à un même réseau équipotentiel de terre.

Cette solution réalise aussi vis-à-vis des phénomènes BF le plus fréquemment rencontrés un écran électrostatique, et, quand elle est exécutée à l'extrémité convenable (à déterminer selon les conditions d'impédance, ou constructives, généralement côté électronique à la masse mécanique de la baie) procure la réduction maximale des tensions différentielles. Elle évite les circulations de courant dans l'écran.

Mais d'importantes tensions de mode commun peuvent apparaître entre écran et conducteur d'une part et la terre d'autre part, d'où risque de claquage et potentiel dangereux pour le personnel ; en HF la protection électromagnétique est inefficace.

Cette solution s'applique en général aux installations très bas niveau (thermocouples) ou pour lesquelles les deux extrémités de l'écran ne peuvent être raccordées à un même réseau équipotentiel (câble surisolé de télécommunications aux entrées de poste HT).

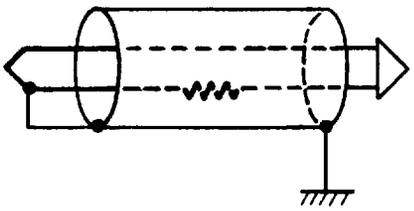
Il a été montré que dans le cas de lignes refermées sur des impédances terminales faibles devant l'impédance caractéristique de ces lignes, le couplage électrique était négligeable devant le couplage magnétique. C'est pour cette raison qu'il est recommandé de ne jamais raccorder simultanément à la masse les deux extrémités d'une même ligne afin de diminuer l'effet du couplage magnétique.

Les analyses effectuées au cours d'une campagne systématique ont conduit à formuler les recommandations de câblage suivantes :

- Les thermocouples isolés seront référencés à la masse du côté thermocouple par une liaison à l'écran. Cet écran sera réuni à la masse en un seul point, du côté de la mesure ;
- Les thermocouples à la masse seront traités de la même manière (écran réuni à la masse en un seul point, du côté de la mesure) bien que cela ne corresponde pas entièrement à l'optimum mis en évidence ;
- Chaque thermocouple sera réuni à l'électronique à l'aide d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure d'environ 2 Hz et de pente de 12 db/octave.

L'avantage de suivre une règle unique et facile à mettre en pratique l'emporte en effet nettement, compte tenu du faible écart d'efficacité des deux solutions possibles.

a) pour les thermocouples isolés



b) pour les thermocouples à la masse

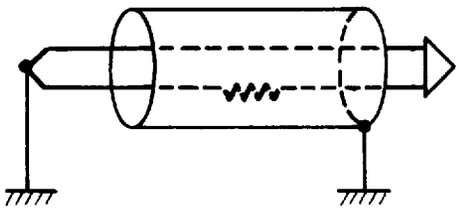


Figure 33 : **Schémas de raccordement recommandés.**

Cas des thermocouples regroupés sous un seul écran

Les perturbations recueillies sur un câble multipaire convenablement mis sous écran et raccordé à la masse (écran commun relié à la masse en un seul point du côté mesure) ne sont pas significativement différentes de ce que l'on obtient avec des lignes sous écran individuel.

L'emploi de câble de regroupement de lignes de mesures bas niveau sans écran individuel n'entraîne pas de niveau plus important de perturbations à caractère permanent, à la condition toutefois de raccorder convenablement à la masse l'écran du câble de regroupement.

Remarque :

1) En cas de perturbations à large spectre de fréquence, l'utilisation d'un second écran extérieur mis à la terre à ses deux extrémités est recommandée.
2) Dans un câble de regroupement dont les lignes individuelles sont sous écran mis à la terre du côté électronique, il est avantageux de mettre l'écran du câble de regroupement à la terre à ses deux extrémités.

6.4. SUGGESTION POUR LA REALISATION PRATIQUE DES PRISES DE TERRE DE RESEAUX AERIENS DE DISTRIBUTION MT ET BT

L'application des principes énoncés précédemment conduit à suggérer les dispositions suivantes, dont la mise en oeuvre sera précisée dans les documents techniques d'application.

6.4.1. Tranformateurs MT/BT sur poteau et interrupteurs aériens

La protection des postes MT/BT contre les surtensions doit être réalisée de manière à éviter les avaries de 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. Ainsi, tout défaut à la terre simple ou double se produisant en un ou plusieurs des points quelconques d'un réseau a pour conséquence d'élever 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 la masse, 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 (cuve du transformateur, terre des éclateurs) et du neutre BT sont deux solutions qui présentent chacune leurs avantages et inconvénients :

- l'interconnexion supprime toute contrainte électrique entre les enroulements BT et la cuve des transformateurs, mais, en cas de défaut sur le réseau MT, elle conduit à transmettre sur le neutre BT l'intégralité de la montée en potentiel des masses MT, ce qui augmente le risque de dégats sur les installations intérieures des clients (appareils électroménagers mis à la terre, téléphone, conduites d'eau...),
- la séparation permet théoriquement de découpler totalement les masses MT du neutre BT et donc d'éviter de transmettre les montées en potentiel de la MT vers les clients. Les enroulements BT des transformateurs sont cependant soumis à des contraintes diélectriques qui, dans certaines conditions, peuvent être très élevées au point de dépasser la tenue du matériel. De surcroît, un découplage parfait n'est obtenu que dans la mesure où la (ou les) mise(s) à la terre du neutre BT est (sont) complètement découplée(s) de la terre des masses MT, ce qui demande un éloignement important, pas toujours obtenu en pratique.

La figure 34 présente un schéma pratique où l'interconnexion est réalisée au moyen de parafoudres.

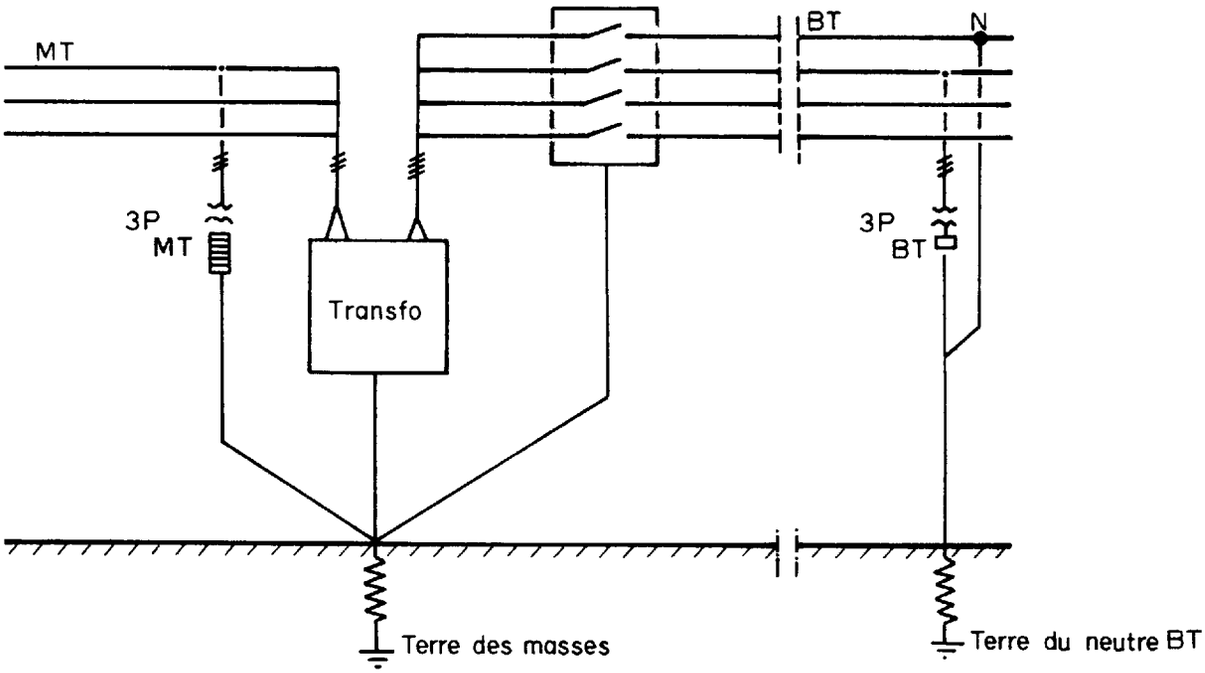


Figure 34 : **Protection complète d'un poste MT/BT avec suppression des risques d'amorçage MT/BT.**

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 manoeuvre 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. De cette ceinture doivent partir quatre à six conducteurs rayonnants enfouis en tranchée à 60 ou 80 cm de profondeur combinés avec des piquets de terre enfoncés obliquement si le sol en permet l'enfoncement. 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 en augmentant 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.

La figure 35 montre le schéma d'une telle prise de terre. (Ainsi qu'il est précisé dans les chapitres précédents, les connexions des conducteurs entre eux doivent être brasées).

Avantages des parafoudres MT sur les éclateurs

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

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'interruption 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 du 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 et de neige, la protection est réalisée par un jeu de parafoudres dont la borne de terre est reliée à la prise de terre des masses.

En pratique, il semble que la tendance soit à l'emploi de parafoudres en plus grand nombre. Cette tendance s'accentue régulièrement.

6.4.2. **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 pluralité des lignes BT.

Par contre, le passage du courant de défaut du réseau MT sur le réseau BT par amorçage en retour dans le poste MT/BT peut avoir des conséquences redoutables (destructions de matériels et incendies).

La mise à la terre du 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 faibles, ce qui est rarement le cas dans les réseaux ruraux, en particulier ceux de montagne où les risques de chute de la foudre sont plus grands et où les possibilités de réalisation de bonnes prises de terre sont réduites.

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 chez le client (par raccordement au réseau de terre précité) à travers un parafoudre, qui n'entre en action que lors de surtensions ;
- protection des phases BT par parafoudres.

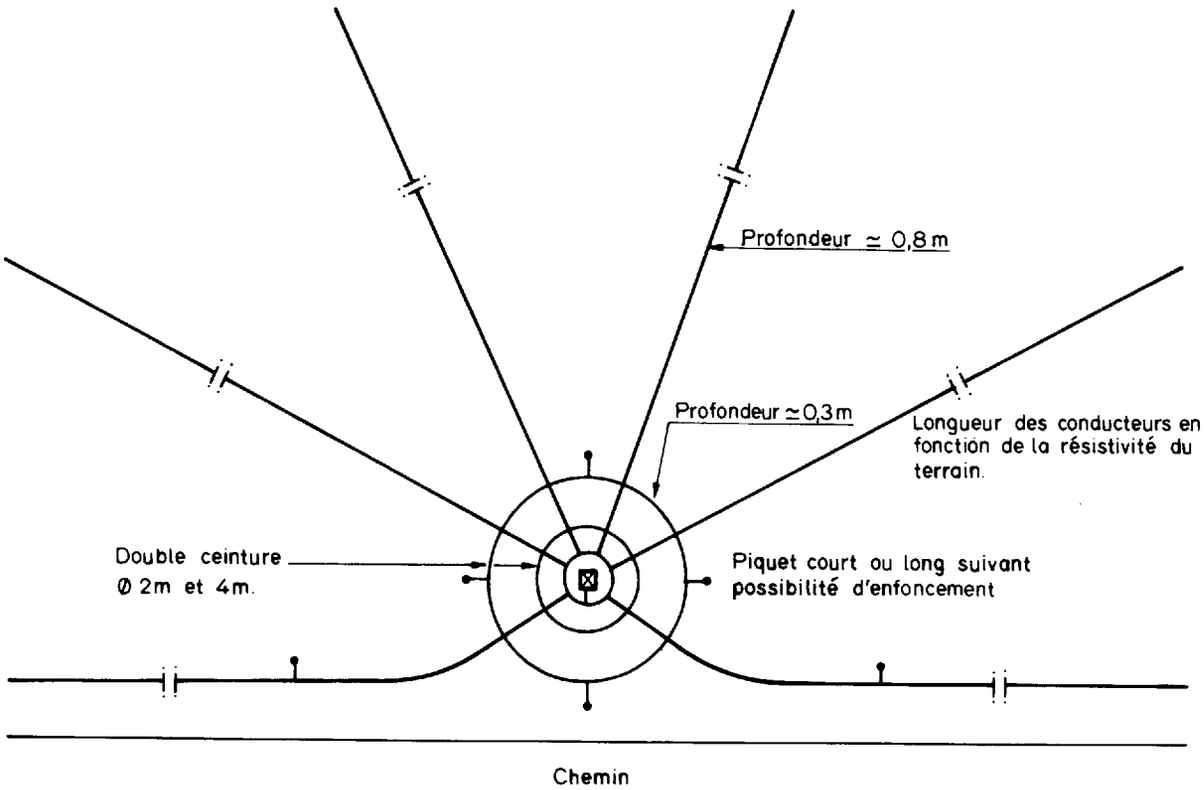


Figure 35 : **Disposition schématique du réseau de terre d'un poste MT/BT en zone foudroyée et sur terrain de forte résistivité.**

Dans ce cas, il est souhaitable de placer en façade, à l'extérieur des bâtiments, les parafoudres protégeant le branchement, c'est-à-dire, avant le compteur et le disjoncteur différentiel, de manière que le courant de décharge des parafoudres ne traverse pas le compteur.

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 36. 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, soit 2,5 kV choc 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, ce qui signifie que cette prise de terre doit maintenir le même potentiel en tous les points de l'installation, toutes les masses présentes dans l'installation (conduites métalliques d'eau, installation de chauffage central, masse des gros appareils électroménagers tels que cuisinières, machines à laver) devant lui être reliées au plus court.

En pratique, EDF installe encore peu de parafoudres BT. Il est préconisé, dans les régions particulièrement exposées aux effets de la foudre, de réaliser des mises à la terre du conducteur neutre tous les 300 m et d'installer des parafoudres entre conducteur de phases et conducteur neutre sur des supports où une mise à la terre du conducteur neutre est établie.

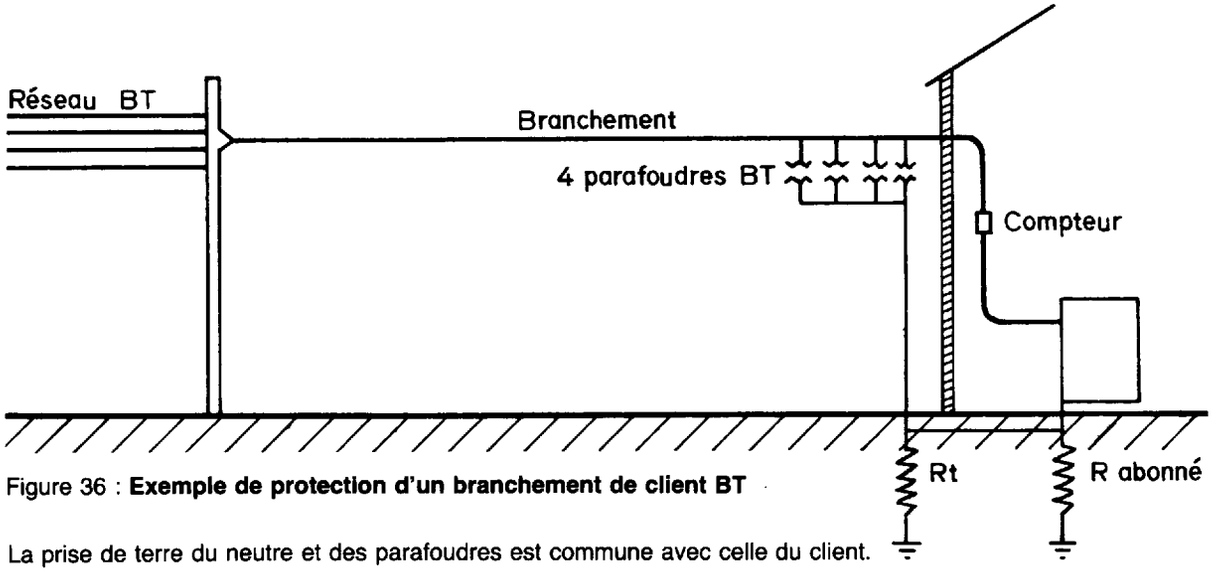


Figure 36 : **Exemple de protection d'un branchement de client BT**

La prise de terre du neutre et des parafoudres est commune avec celle du client.

La figure 37 donne un exemple pratique de ces dispositions pour un bâtiment isolé.

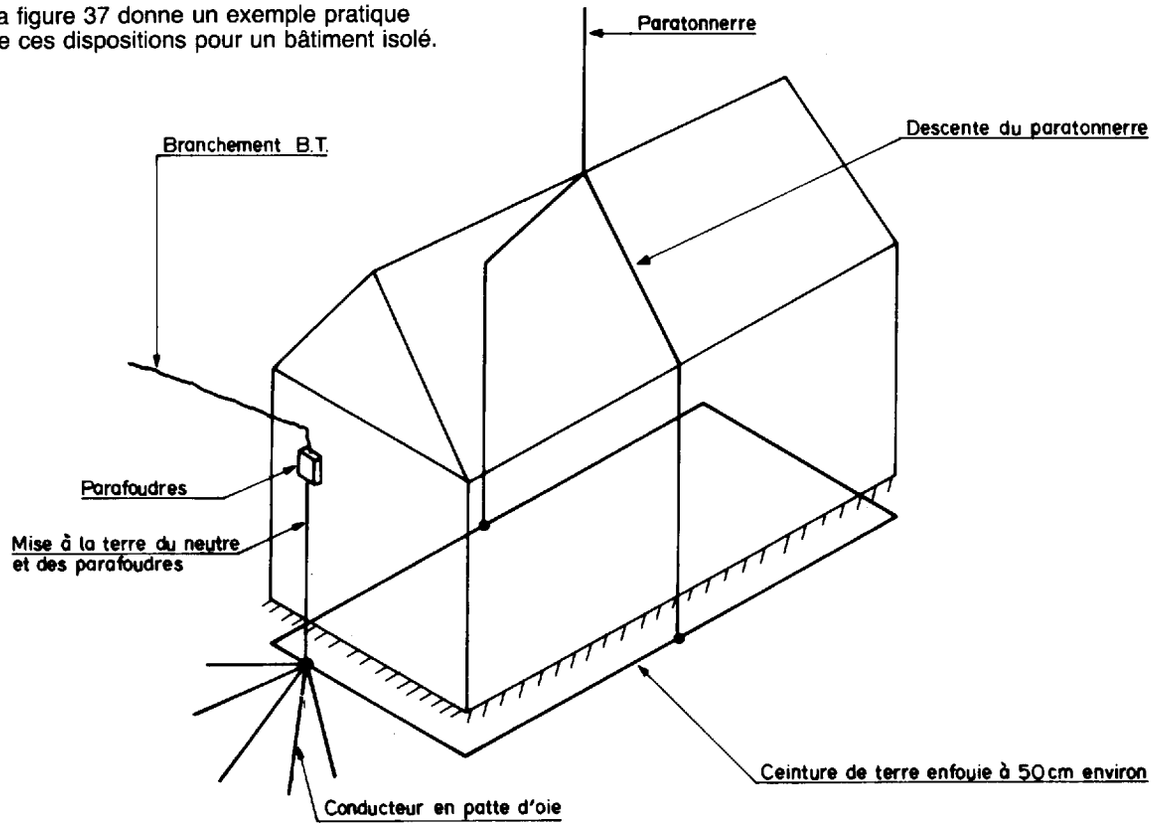


Figure 37 : **Protection de bâtiment dans une zone très foudroyée**

6.4.3. Mise à la terre de bâtiments abritant des animaux

Dans le cas de fermes situées dans les régions très foudroyées, il est indispensable de réaliser un réseau équipotentiel de terre dans les bâtiments abritant des animaux, réseau auquel serait relié l'ensemble des masses électriques et mécaniques.

C'est le moyen de supprimer les électrocutions d'animaux dans les étables.