



(6.3.1) Mise à la terre – Bases de calcul et de conception

Professeur Henryk Markiewicz & Dr Antoni Klajn,
Université de technologie de Wroclaw

Juin 2003

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Définitions de base [1,2]</i>	3
3	<i>Propriétés électriques de la terre</i>	4
4	<i>Propriétés électriques d'une prise de terre</i>	6
5	<i>Résistance de terre et répartition de potentiel</i>	6
6	<i>Tension de terre et gradient de potentiel</i>	9
7	<i>Propriétés des prises de terre pour de forts courants impulsionnels</i>	11
8	<i>Conclusions</i>	12
9	<i>Bibliographie</i>	13



European Copper Institute

L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux



Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Introduction

Le module 6.1 de ce guide donne une vue d'ensemble des exigences d'une liaison à la terre et traite du besoin d'une approche systématique pour sa conception, centrée sur les aspects d'une installation tertiaire. Le présent module traite de la conception d'une mise à la terre tandis que la section 6.5.1 donne des règles pratiques de conception et de calcul d'une prise de terre.

La mise à la terre, parfois simplement appelée « la terre », est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre. La mise à la terre est un élément important d'un réseau électrique, que ce soit en haute ou basse tension. Une bonne mise à la terre est essentielle pour :

- la protection des bâtiments et des installations contre la foudre,
- la sécurité des personnes et des animaux par limitation des tensions de pas et de contact à des valeurs de sécurité,
- la compatibilité électromagnétique (CEM), c'est-à-dire la limitation des perturbations électromagnétiques,
- le fonctionnement correct du réseau d'alimentation électrique afin d'assurer une bonne qualité d'énergie.

Toutes ces fonctions sont assurées par une mise à la terre unique qui doit être conçue pour satisfaire à toutes ces exigences. Certaines parties d'un système de mise à la terre peuvent être prévues pour assurer une fonction particulière, mais elles font néanmoins partie d'un réseau unique de mise à la terre. Les normes exigent que toutes les liaisons de terre d'une installation soient interconnectées, ne formant ainsi qu'un seul réseau.

2 Définitions de base [1,2]

La mise à la terre est l'ensemble des moyens et des mesures par lesquelles un élément d'un circuit électrique, une pièce métallique d'un équipement électrique (partie conductrice accessible) ou une pièce conductrice placée au voisinage d'une installation électrique (partie conductrice extérieure) sont reliés à la terre.

La prise de terre est le conducteur métallique ou l'ensemble des conducteurs métalliques interconnectés ou d'autres pièces métalliques agissant de la même manière, enterré dans le sol et électriquement en contact avec celui-ci, ou intégré dans du béton, lequel étant en contact avec le sol sur une large surface (par exemple les fondations d'un bâtiment).

Le conducteur de terre est un conducteur qui relie une partie d'installation électrique, une partie conductrice accessible ou une partie métallique conductrice situées dans l'environnement électrique, à la prise de terre ou qui relie différentes prises de terre. Le conducteur de terre chemine sur le sol ou, s'il est enterré dans le sol, doit être isolé de celui-ci.

La terre de référence est la partie du sol, en particulier à la surface, localisée en dehors de la sphère d'influence de la prise de terre considérée, c'est-à-dire entre deux points quelconques pour lesquels il n'y a pas de tension perceptible résultant de la circulation du

courant dans cette prise de terre. Le potentiel de la terre de référence est toujours considéré comme nul.

La tension de terre (potentiel de terre) V_E est la tension se déclarant entre la prise de terre et la terre de référence à une valeur donnée du courant circulant dans cette prise de terre.

La résistivité du sol ρ (résistance spécifique de terre) est la résistance mesurée entre deux faces opposées d'un mètre cube de terre (figure 1). La résistivité de terre est exprimée en Ωm .

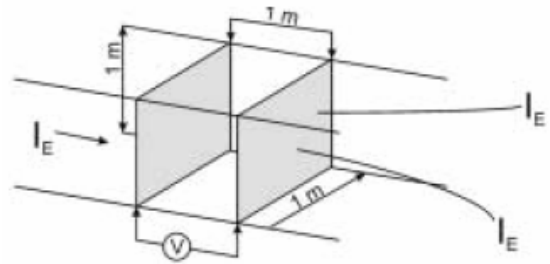


Figure 1 – diagramme illustrant le sens physique de la résistivité du sol ρ

Potentiel surfacique de terre V_x est la tension entre un point x de la surface du sol et la terre de référence.

3 Propriétés électriques de la terre

Les propriétés électriques du sol sont caractérisées par la résistivité de la terre ρ . Malgré la définition relativement simple de ρ donnée précédemment, la détermination de sa valeur est souvent une tâche compliquée pour deux principales raisons :

- Le sol n'est pas une structure homogène, mais est formé de couches de différentes matières,
- La résistivité du sol d'un type donné peut varier largement (tableau 1) et est très dépendante de l'humidité contenue.

Type de sol	Résistivité du sol ρ [Ωm]	
	Plage de valeurs	Valeur moyenne
Sol marécageux	2 - 50	30
Argile à briques	2 - 200	40
Boue et argile sablonneuse, humus	20 - 260	100
Sable ou sol sablonneux	50 - 3 000	200 (humide)
Tourbe	> 1 200	200
gravier (humide)	50 - 3 000	1 000 (humide)
Sol pierreux et rocaillieux	100 - 8 000	2 000
béton : 1 part de ciment + 3 parts de sable	50 - 300	150
1 part de ciment + 5 parts de gravier	100 - 8 000	400

Tableau 1 – Résistivité du sol ρ pour différents types de terrains et de béton

Le calcul de la résistance de terre nécessite une bonne connaissance des propriétés du sol, en particulier sa résistivité ρ . Ainsi, les variations importantes des valeurs de ρ sont un problème. Dans beaucoup de situations pratiques, une structure homogène du sol sera supposée avec une valeur moyenne de ρ , laquelle doit être estimée sur la base d'analyse du sol ou par la mesure. Il y a de solides techniques de mesure de la résistivité du sol. Un point important est que la distribution du courant dans les couches du sol utilisé au cours de la mesure doit simuler celle de l'installation finale. Par conséquent, les mesures doivent toujours être interprétées prudemment. Lorsqu'il n'y a pas d'informations disponibles en ce qui concerne la valeur de ρ , il est couramment supposé que $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Cependant, comme le montre le tableau 1, la valeur réelle peut être très différente, et un test de réception de l'installation finale, avec une estimation des variations probables dues aux conditions atmosphériques et à la durée de vie, doit être effectué.

Un autre problème, dans la détermination de la résistivité du sol, est l'humidité qui peut varier sur une large gamme, en fonction de la situation géographique et des conditions atmosphériques, depuis un faible pourcentage dans les régions désertiques, jusqu'à 80 % pour les régions marécageuses. La résistivité de terre dépend principalement de ce paramètre. La figure 2 illustre ce rapport entre la résistivité et l'humidité pour de l'argile. On peut constater que, pour des valeurs d'humidité supérieures à 30 %, les variations de ρ sont faibles et non significatives. Cependant, lorsque le sol est sec, c'est-à-dire pour des valeurs d'humidité inférieures à 20%, la résistivité augmente rapidement.

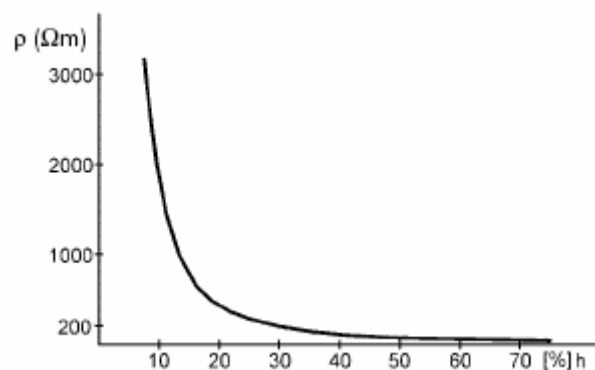


Figure 2 - résistivité du sol ρ de l'argile en fonction de l'humidité du sol h

Dans les régions tempérées, les pays européens par exemple, la résistance de terre varie en fonction des saisons à cause de la dépendance de l'humidité du sol avec la résistivité de terre. En Europe, cette dépendance est approximativement de forme sinusoïdale, où la valeur maximale de la résistance de la terre apparaît en février et la valeur minimale en août. La valeur moyenne apparaît en mai et en novembre. L'amplitude en février est approximativement 30 % supérieure à la moyenne, tandis qu'en août elle est 30 % inférieure [4].

Il est bon de rappeler que les effets du gel sont similaires à la sécheresse ; la résistivité augmente significativement.

Pour ces raisons, les calculs d'une résistance de terre et la conception d'une prise de terre peuvent être réalisés jusqu'à un niveau limité d'exactitude.

4 Propriétés électriques d'une prise de terre

Les propriétés électriques d'une prise de terre dépendent essentiellement de deux paramètres :

- la résistance de la terre,
- la configuration de la prise de terre.

La résistance de terre détermine la relation entre la tension de terre V_E et la valeur du courant circulant dans la terre. La configuration de la prise de terre détermine la répartition de potentiel à la surface de la terre, qui se présente comme le résultat de la circulation du courant dans la terre. La distribution du potentiel à la surface du sol est une considération importante dans l'évaluation du degré de protection contre les chocs électriques car cela détermine les tensions de contact et de pas. Ces points sont brièvement abordés ci-dessous.

La résistance de terre a deux composantes :

- la résistance de dissipation R_D , qui est la résistance de la terre située entre la prise de terre et la terre de référence,
- la résistance R_L des parties métalliques de la prise de terre et du conducteur de terre.

La résistance R_L est normalement plus faible que la résistance de dissipation R_D . La résistance de terre est donc normalement supposée être égale à la résistance de dissipation R_D . Dans la littérature, la "résistance de terre" désigne habituellement la résistance de dissipation.

N'importe quelle connexion de terre rendue disponible par le distributeur d'énergie apparaît en parallèle avec la terre fournie localement et l'on peut s'attendre à ce qu'elle ait une impédance plus faible pour l'ensemble du spectre en fréquence. Toutefois, la disponibilité et les caractéristiques de cette connexion sont indépendantes de la maîtrise du concepteur et par conséquent, elle ne peut pas être prise en compte dans la conception d'une prise de terre qui doit être adaptée au besoin du contexte.

5 Résistance de terre et répartition de potentiel

Dans un circuit alternatif, on doit essentiellement considérer l'impédance Z_E , qui est l'impédance entre la prise de terre et la terre de référence à une fréquence d'exploitation donnée. La réactance d'une prise de terre est la réactance du conducteur de terre et des pièces métalliques constituant la prise de terre. A basses fréquences, la fréquence d'alimentation et les harmoniques associées, la réactance est normalement négligeable comparée à la résistance de terre, mais doit être prise en considération pour les fréquences élevées contenues dans un transitoire de coup de foudre. Ainsi, pour les basses fréquences, il est supposé que l'impédance de terre Z_E est égale à la résistance de dissipation R_D , qui est à son tour supposée approximativement égale à la résistance de terre R :

$$Z_E \approx R_D \approx R \quad (1)$$

La résistance de terre R d'une prise de terre dépend de la résistivité du sol ainsi que de la géométrie de la prise de terre. Afin d'atteindre de faibles valeurs de R , la densité de courant circulant de l'électrode de terre vers la terre devrait être faible, c'est-à-dire que le volume de terre à travers lequel le courant circule est aussi grand que possible. Une fois que la circulation de courant est répartie depuis le piquet de terre vers le sol, la densité de courant diminue. Si la prise de terre est physiquement petite, par exemple un point, cet effet est important, mais il est fortement réduit pour une plaque dans laquelle la répartition est seulement efficace aux bords. Cela signifie que les piquets, tubes ou les conducteurs nus ont une bien plus faible résistance de dissipation que, par exemple, une plaque conductrice ayant la même surface de contact. D'ailleurs, il est bien précisé dans la littérature que la corrosion provoquée en alternatif et en continu augmente avec la densité de courant. Une faible densité de courant augmente la durée de vie de l'électrode.

Le calcul d'une résistance de terre est normalement exécuté en supposant que la terre est infinie et de structure uniforme avec une valeur de résistivité donnée. Il est possible de déterminer de manière sûre les équations régissant la résistance de terre mais, en pratique, leurs utilités sont très limitées, particulièrement dans le cas de prises de terre complexes et maillées où les relations mathématiques deviennent très compliquées. En outre, même une petite inexactitude dans la valeur de la résistivité a une influence significative sur la valeur réelle de la résistance de terre d'une prise de terre maillée, et il est souvent très difficile de déterminer la résistivité de terre avec la précision requise. C'est pourquoi les équations théoriques précises de la résistance de terre sont utilisées uniquement pour des structures de prise de terre simples afin d'illustrer la relation entre la tension de terre, la distribution du potentiel de terre et le courant de terre. Pour les prises de terre étendues et maillées, des approximations de la résistance de terre sont utilisées.

Une modélisation de base d'une configuration d'une prise de terre, utilisée pour illustrer les propriétés électriques fondamentales, est un hémisphère enfoncé dans le sol (figure 3).

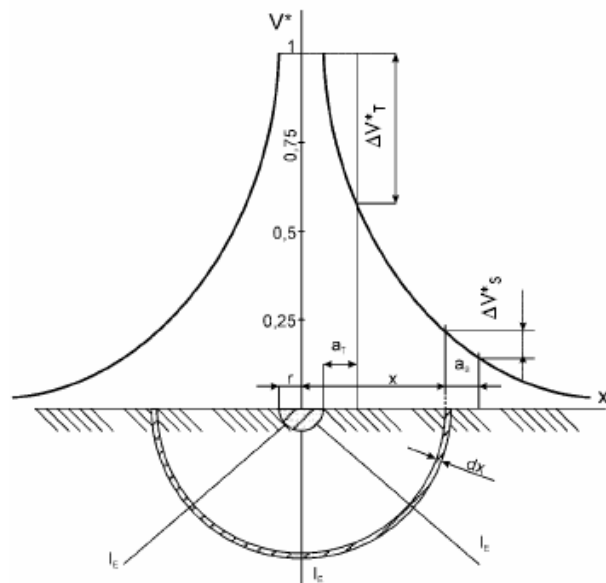


Figure 3 – illustration de la notion d'électrode de terre hémisphérique montrant les paramètres requis pour calculer la résistance de terre et la distribution de potentiel à la surface du sol (avec $\rho = \text{constant}$)

- r** rayon d'électrode
- x** distance à partir du centre de l'électrode
- a_T, a_S** distances respectives de contact et de pas
- V^*** valeur relative de la distribution de potentiel
- $\Delta V^*_T, \Delta V^*_S$** tensions respectives de contact et de pas

Les lignes de courant de terre circulant depuis l'électrode vers la terre sont supposées radiales. La surface de l'hémisphère, ainsi que toutes les coques hémisphériques d'épaisseur de sol d_x , constituent des équipotentielles orthogonales en tout point aux lignes de courant. Dans ces conditions, la résistance d'une coque hémisphérique d'épaisseur d_x , à une distance x du centre est déterminée par (en supposant que ρ est constant) :

$$dR = \frac{\rho}{2\pi \cdot x^2} dx \quad (2)$$

La résistance d'une électrode de terre hémisphérique est donnée par :

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

La résistance de terre dépend significativement de la profondeur d'enfouissement de l'électrode dans le sol. Ceci est dû au fait que l'humidité du sol est plus importante et plus stable pour les couches de sol profondes que pour les couches superficielles. Les couches proches de la surface sont plus influencées par les variations saisonnières et à court terme et sont sujettes au gel. Ce problème est illustré à la figure 4, pour les prises de terre constituées par un piquet, où l'on peut voir la diminution considérable de la résistance de terre en fonction de l'augmentation de la profondeur d'enfouissement du piquet. Cependant, il n'est pas toujours possible d'enfouir le piquet à la profondeur désirée pour des raisons géologiques, par exemple lorsque des cailloux ou des obstacles sont près de la surface ou encore lorsque le système de terre couvre une large surface.

On peut distinguer différents types d'électrodes de terre, comprenant :

- *électrode de surface simple* constituée d'une plaque ou d'un câble, en forme de méplat ou de boucle,
- *électrode maillée* constituée d'une grille placée horizontalement à faible profondeur,
- *câble avec une gaine métallique exposée*, ou blindage se comportant de manière similaire à un piquet de terre de type bande,
- *électrode de terre de fondation* formée par une structure conductrice noyée dans le béton des fondations fournissant une large surface de contact avec le sol.
- *électrodes tubulaires* qui peuvent être constituées de tubes, de piquets, etc., et sont enfouis à une profondeur supérieure à 1m, et couramment de 3 à 30 m ou plus.

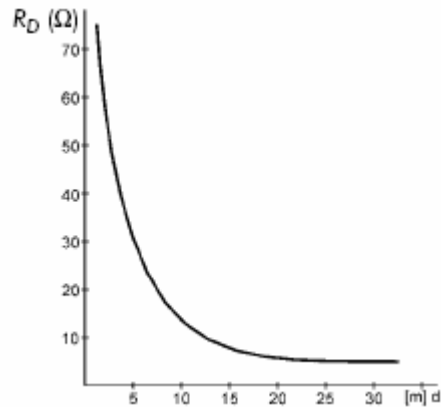


Figure 4 - Exemple de dissipation de la résistance d'une électrode tubulaire dont la longueur croît progressivement en fonction de la profondeur d

Les quatre premiers systèmes sont des prises de terre de surface qui sont habituellement constituées de conducteurs ou de bandes radiales, en anneau ou maillées, ou une combinaison de ces solutions, enterrées à des profondeurs ne dépassant pas 1 m. Un avantage important de cette solution est la distribution de potentiel favorable en surface. Les piquets de terre appartiennent à la famille des prises de terre profondes ; leur avantage est de traverser différentes couches du sol de différentes conductivités et ils sont principalement utilisés lorsque le sol de surface a une mauvaise conductivité. Ainsi, il est aisé d'obtenir une résistance de prise de terre escomptée (figure 4). Un autre avantage des piquets de terre est qu'ils peuvent être installés dans des endroits où la surface disponible pour installer une prise de terre est limitée. Cependant, la répartition du potentiel en surface n'est pas bonne avec des piquets de terre et donc, en pratique, des combinaisons de piquets et d'électrodes de surface sont utilisées afin d'obtenir une bonne résistance et la répartition de potentiel en surface désirées. La répartition du potentiel en surface est l'objet du paragraphe suivant.

Une description plus détaillée et les équations de bases concernant la résistance de terre pour les électrodes de terre mentionnées sont fournies au chapitre 6.5.1.

6 Tension de terre et gradient de potentiel

La tension de terre, comme le gradient de potentiel durant la circulation du courant dans la prise de terre, sont des paramètres importants pour la protection contre les chocs électriques. Les relations de base montrant la modélisation de la terre sont présentées à la figure 3.

Le potentiel d'un point quelconque situé à une distance x du milieu de l'électrode de terre, dans laquelle circule un courant I_E , peut être exprimé par l'équation suivante :

$$V_x = \frac{\rho I_E}{2\pi x} \quad (4)$$

et sa valeur relative :

$$V_x^* = \frac{V_x}{V_E} \quad (4a)$$

où V_E est la tension de terre, qui est égale au potentiel de terre (en supposant que le potentiel de la terre de référence est égal à zéro). Le potentiel de terre peut être exprimé de la manière suivante :

$$V_E = I_E R_E = \frac{\rho I_E}{2\pi r} \quad (5)$$

La différence de potentiel entre deux points de la surface du sol (l'un situé à une distance x et l'autre situé à une distance $x+a_s$, où a_s est supposée égal à 1 mètre) définit la tension de pas ΔV_S , c'est-à-dire le gradient de potentiel existant entre deux pieds lorsqu'une personne se tient debout sur le sol :

$$V_S = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_s} \right) \quad (6)$$

et sa valeur relative :

$$V_S^* = \frac{V_S}{V_E} \quad (6a)$$

où $x \geq r$.

Une relation équivalente peut être écrite pour n'importe quelle autres distances x et a . En particulier, pour $x = r$ et $a = a_T = 1$ m, la formule (6) permet le calcul de la tension de contact, c'est-à-dire la tension entre la main et le pied d'une personne touchant simplement l'électrode de terre ou une pièce métallique reliée à celle-ci :

$$V_T = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + a_T} \right) \quad (7)$$

et sa valeur relative :

$$V_T^* = \frac{V_T}{V_E} \quad (7a)$$

Une illustration pratique des tensions de pas et de contact est montrée à la figure 5. Les personnes A et B sont sujettes à la tension de contact tandis que la personne C est sujette à la tension de pas. La tension de contact V_T est parfois différenciée de la tension de choc au touché V_{TS} , (et la tension de pas V_S de la tension de pas de choc V_{SS}). Les tensions V_T et V_S sont les valeurs exactes issues du gradient de potentiel alors que V_{TS} et V_{SS} prennent en considération les légères variations du gradient de potentiel engendrées par la circulation du courant de choc, c'est-à-dire incluant les effets de distorsion du courant circulant à travers une personne. En pratique, la différence entre V_S et V_{SS} ou V_T et V_{TS} est normalement faible, et les mêmes valeurs pour les tensions respectives sont supposées : $V_S \approx V_{SS}$ et $V_T \approx V_{TS}$.

La partie gauche de la figure 5 présente le cas d'une électrode de type piquet, tandis que la partie droite montre le cas pour une électrode maillée. Le piquet (1) a une résistance faible mais le gradient de potentiel le plus défavorable tandis que le profil du gradient de potentiel du maillage (2) est beaucoup plus aplati. La tension de contact (personne A) est considérablement plus importante pour le piquet (1) que pour le maillage (2) (personne B). La tension de pas (personne C) est également moins dangereuse dans le cas d'un maillage.

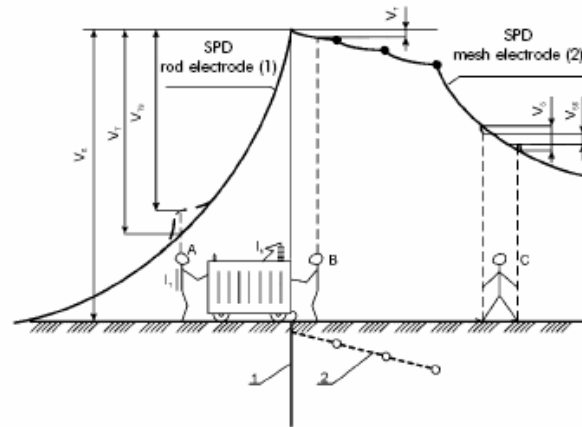


Figure 5 – comparaison du gradient de potentiel de la surface de la terre pendant la circulation du courant dans la prise de terre pour deux systèmes d'électrode de terre

- 1** piquet
- 2** maillage
- V_E tension de terre
- V_T, V_{TS} tension de contact et tension de choc au touché
- V_S, V_{SS} tension de pas et tension de pas de choc
- I_T courant d'électrification
- I_K courant de court-circuit équivalent au courant de défaut circulant dans les masses métalliques
- A, B, C** personnes à des potentiels de terre différents

Lorsqu'une prise de terre maillée n'est pas réalisable, une boucle à fond de fouille (couramment utilisée en Belgique et en Allemagne par exemple) fournit une solution intermédiaire combinant un coût et une sécurité raisonnable.

La résistance de terre détermine la valeur de la tension de terre, alors que la configuration de la prise de terre a une influence significative sur le gradient de potentiel à la surface du sol.

Naturellement, cette configuration influence également la résistance de terre (une prise de terre maillée est en contact avec un grand volume de terre) donc la résistance et la configuration doivent être considérées ensemble. Il est à noter que, puisqu'une prise de terre en maillage occupe une grande surface, il n'est pas pratique de l'enterrer profondément et elle sera plus sensible aux variations d'humidité dans le sol. L'amélioration de la stabilité de la résistance peut être obtenue en ajoutant un certain nombre de piquets longs verticaux dans ce maillage.

Les électrodes maillées augmentent la surface de contact, ce qui conduit à une montée en potentiel due au courant issu de l'électrode de terre. Au-dessus de la surface du maillage, une équipotentialité existe mais à la périphérie, il y a un gradient de potentiel comme le montre la figure 6a. Bien qu'il n'y ait pas de tension de contact (car le maillage s'étend au-delà des structures métalliques de plus de 1 mètre) une tension de pas dangereuse peut apparaître. Cette situation peut se produire, par exemple, dans le réseau de terre d'une sous-station. Afin d'éviter ce phénomène, les éléments extérieurs au maillage de terre doivent être placés plus profondément que le reste de la grille (figure 6c).

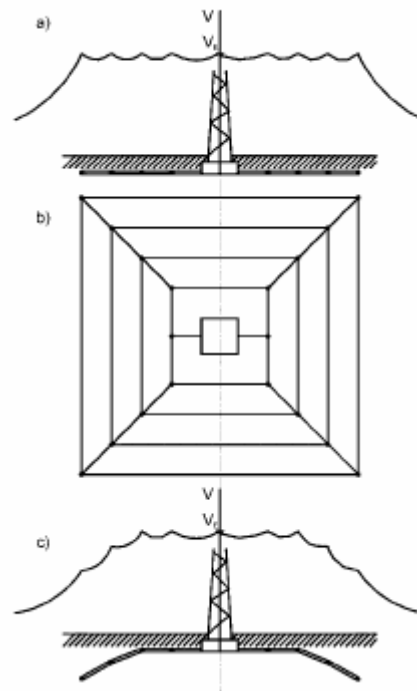


Figure 6 - Phénomène d'étalement de potentiel. Gradient de potentiel de la surface de la terre pour deux électrodes maillées.

- a) électrode plane maillée
- b) plan de l'électrode
- c) électrode avec les deux derniers éléments enterrés plus profondément.

7 Propriétés des prises de terre pour de forts courants impulsionnels

Précédemment, les caractéristiques d'une prise de terre ont été traitées en supposant une circulation de courant modérée constante à la fréquence nominale du réseau. Les différences entre les propriétés d'un courant constant et d'un courant impulsionnel dans les prises de terre sont causées principalement par :

- une circulation de courant de valeur très élevée, jusqu'à plusieurs centaines de kA,
- un temps de montée très rapide – la foudre peut classiquement atteindre quelques centaines de kA/μs.

La densité de courant extrêmement élevée dans le sol augmente l'intensité du champ électrique jusqu'à des valeurs pouvant causer des décharges électriques dans de petites poches gazeuses, diminuant la résistivité du sol et la résistance de terre. Ce phénomène a surtout lieu près de l'électrode de terre, où la densité de courant est la plus grande, et

l'influence la plus significative. L'intensité de ce phénomène est particulièrement élevée lorsque le sol est sec ou de grande résistivité.

L'inductance des parties métalliques d'une électrode de terre, qui peut être supposée égale à $1 \mu\text{H/m}$, est normalement négligée au regard de l'impédance de terre à la fréquence nominale du réseau. Cependant, l'inductance devient un paramètre important lorsque la variation de courant est élevée, aux alentours de centaines de kA/ms ou plus. A l'occasion d'un éclair, la chute de tension inductive ($L \times di/dt$) atteint des valeurs très élevées. Comme conséquence, les parties éloignées de la prise de terre jouent un rôle réducteur dans la circulation du courant à la terre.

La résistance de terre lors d'impulsions de courant augmente par rapport à sa valeur dans des conditions statiques. Ainsi, l'augmentation de la longueur des électrodes de terre au-delà de ce qu'on appelle la longueur critique (figure 7) ne cause pas de diminution de l'impédance de terre lors des transitoires.

A l'occasion d'un éclair, les deux phénomènes décrits ci-dessus ont un effet, mais opèrent de façon opposée. Le courant de terre élevé diminue la résistance tandis que les hautes fréquences augmentent l'impédance. L'impédance globale peut être plus grande ou plus petite, en fonction de l'effet dominant.

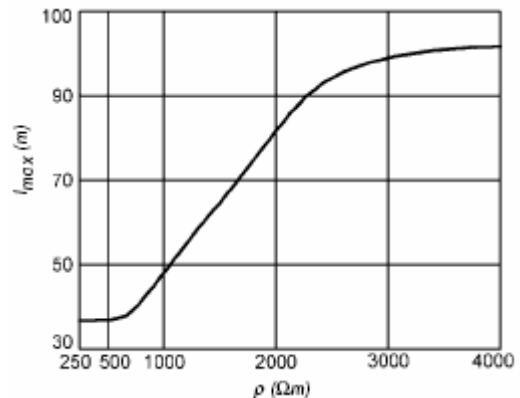


Figure 7 – longueur maximale l_{max} des électrodes de la prise de terre d'un paratonnerre en fonction de la résistivité du sol ρ

8 Conclusions

La résistance de terre et le gradient de potentiel sont les paramètres majeurs caractérisant les propriétés électriques des prises de terre.

Les paramètres électriques des prises de terre dépendent des propriétés du sol et de la forme géométrique de l'électrode de terre. Les propriétés du sol sont caractérisées par la résistivité de la terre, qui peut varier sur une grande plage, allant de quelques Ωm jusqu'à plusieurs milliers d' Ωm , en fonction du type de sol et de sa structure, ainsi que de son humidité. Par conséquent, il est difficile de calculer une valeur exacte de la résistance de terre. Toutes les relations décrivant la résistance de terre proviennent de l'hypothèse que le sol a une structure homogène et une résistivité constante.

Idéalement, le gradient de potentiel sera plat dans la zone autour de l'électrode de terre. C'est important pour la protection contre les chocs électriques, et ceci est caractérisé par les tensions de contact et de pas. Les piquets ont un plus mauvais gradient de potentiel, tandis que les maillages ont une meilleure distribution plane.

Le comportement d'une prise de terre lors d'un transitoire à fréquence élevée de courant devra être considéré. Les valeurs très élevées de courant diminuent la résistance de terre à cause du fort champ électrique entre l'électrode de terre et le sol, tandis que les variations

brusques du courant augmentent l'impédance de terre à cause de l'inductance de l'électrode de terre. L'impédance de terre est dans ce cas la superposition de ces deux événements.

9 Bibliographie

- [1] HD 637 S1 'Power installations exceeding 1 kV a.c', 1999.
- [2] ABB Switchgear Manual, 10th edition, Dusseldorf, Cornelsen Verlag 1999.
- [3] IEC 364-5-54: 1980 'Electrical installations of buildings – Part 5: Selection and erection of electrical equipment – Chapitre 54: Earthing arrangements and protective conductors'
- [4] Rudolph W., Winter O. EMV nach VDE 0100. VDE-Schriftenreihe 66. VDE-Verlag GmbH. Berlin, Offenbach, 1995.