



(6.5.1) Mise à la terre – Aspects fondamentaux de construction

Henryk Markiewicz & Antoni Klajn

Université de technologie de Wrocław

Juillet 2004

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Fonctions d'un système de liaison à la terre et exigences fondamentales</i>	4
3	<i>Résistance et gradient de potentiel pour différents types de prise de terre</i>	5
4	<i>Exemples numériques</i>	12
5	<i>Aspects constitutifs des électrodes de terre</i>	14
6	<i>Conclusions</i>	18
7	<i>Références et bibliographies</i>	18

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

Les informations de base des propriétés d'une prise de terre sont présentées à la section 6.3.1, "Mise à la terre – Bases de calcul et de conception". Ce chapitre se présente comme un guide de conception, traitant des questions pratiques de calcul et de réalisation. Les principaux sujets abordés ici sont :

- résistance de terre pour différentes réalisations de prise de terre,
- matériaux utilisés pour la réalisation de prise de terre,
- corrosion des prises de terre.

Les définitions et les formules de base pour calculer la résistance d'une prise de terre et le gradient de potentiel d'une prise de terre hémisphérique idéale sont décrites dans le chapitre 6.3.1. Des méthodes similaires permettent la formulation de relations pour d'autres configurations de prises de terre. Toutefois, toutes ces formules sont définies à partir de l'hypothèse fautive que le sol est homogène et infini. En outre, la résistivité du sol varie en fonction de son humidité et par conséquent en fonction des saisons. De ce fait, la valeur de la résistance de terre calculée avec les formules énoncées ici ne doivent pas être considérées comme exactes. D'autre part, en pratique, un haut niveau de précision n'est pas nécessaire lors du calcul ou de la mesure de la résistance d'une prise de terre. Ce paramètre n'a qu'une influence indirecte aussi bien sur le fonctionnement du réseau électrique et des équipements que sur la protection contre les chocs électriques. Dans les normes actuelles et les recommandations de la majorité des pays, les valeurs maximales admissibles ne sont pas spécifiées, seulement les plus petites valeurs possibles sont seulement recommandées [1]. Ainsi, les valeurs des résistances de terre, calculées avec les formules données ci-après, doivent être considérées comme approximatives et, en pratique, une précision de $\pm 30\%$ peut être considérée comme acceptable. De ce fait, il n'y a aucune raison de définir des relations précises, en particulier pour les prises de terre complexes ou maillées.

Un avantage des formules définies pour des réalisations simples de prises de terre est qu'elles permettent de visualiser clairement les relations basiques entre la résistance d'une prise de terre et sa géométrie. Bien sûr, il est recommandé de toujours utiliser la relation la plus exacte disponible. Toutefois, en pratique, bien que les formules soient utilisées pour la conception de la prise de terre, l'information la plus exacte concernant la résistance de la prise de terre sera donnée par la mesure réelle in situ.

Le sujet principal traité ici est le calcul d'une résistance de terre et du gradient de potentiel pour différentes prises de terre. Les prises de terre typiques comprennent :

- une électrode de surface simple constituée d'un méplat ou d'un câble, posé en ligne droite ou en boucle,
- des piquets de terre (verticaux) de longueur suffisante pour traverser les couches de conductivité différente du sol ; ils sont particulièrement recommandés si les couches supérieures ont une conductivité médiocre comparées aux couches plus profondes ou si la place est insuffisante pour installer une électrode de surface,

- une électrode maillée constituée d'une grille placée horizontalement à faible profondeur,
- un câble avec effet de prise de terre : câble avec une gaine métallique exposée, ou blindage, se comportant de manière similaire à un piquet de terre de type méplat,
- des électrodes de terre de fondation formée par une structure conductrice noyée dans le béton des fondations fournissant une large surface de contact avec le sol.

2 Fonctions d'un système de liaison à la terre et exigences fondamentales

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

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

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

$$V_E \leq V_F \quad (1)$$

Ainsi, la valeur maximale admissible d'une résistance de terre est :

$$R = \frac{V_F}{I_E} \quad (2)$$

où I_E est le courant de court-circuit monophasé dans les conditions les plus défavorables.

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

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

La descente de terre d'une protection contre la foudre conduit les courants de foudre dans la terre. Les courants de foudre peuvent atteindre d'importantes valeurs crêtes, i_p , et créer de très forts potentiels d'électrode de terre, V_E , qui peuvent être calculés avec la formule suivante :

$$V_E \approx \sqrt{\left(L \frac{di_p}{dt}\right)^2 + (i_p R_p)^2} \quad (3)$$

où :

L est l'inductance de l'électrode de terre et des descentes de foudre

R_p est la résistance dynamique de l'électrode de terre

En fonction du courant de foudre et des propriétés du système de liaisons équipotentielles, le potentiel V_E , peut atteindre des valeurs très élevées, jusqu'à plusieurs centaines ou même milliers de kV. Puisque ces valeurs sont plus importantes que les tensions de fonctionnement du réseau, la foudre cause souvent des claquages ou induit des surtensions dans l'installation. Ainsi, une protection complète des installations contre la foudre nécessite l'installation d'un système de parafoudres et d'éclateurs.

3 Résistance et gradient de potentiel pour différents types de prise de terre

Les simples électrodes de terre de surface sont des piquets métalliques, des méplats ou des tubes placés horizontalement sous la surface du sol à une profondeur donnée, t , comme le montre la figure 1. Habituellement, la longueur de ces éléments, l , est plus grande que t . Dans le cadre de cette hypothèse, le gradient de potentiel de l'électrode de terre, orthogonal à la longueur l , est donné par la formule suivante :

$$V_x = \frac{\rho I_E}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4t^2 + 4x^2} + l}{\sqrt{l^2 + 4t^2 + 4x^2} - l} \quad (4)$$

où :

V_x = potentiel de surface de terre (V)

V_E = Potentiel de l'électrode de terre (V) pour un courant de terre I_E

ρ = résistivité linéique de la terre ($\Omega \cdot m$)

l = longueur de l'électrode de terre (m)

les autres symboles sont expliqués en figure 1.

La valeur relative du potentiel V_x^* est donnée par :

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

où:

V_x^* = valeur relative du potentiel de terre surfacique.

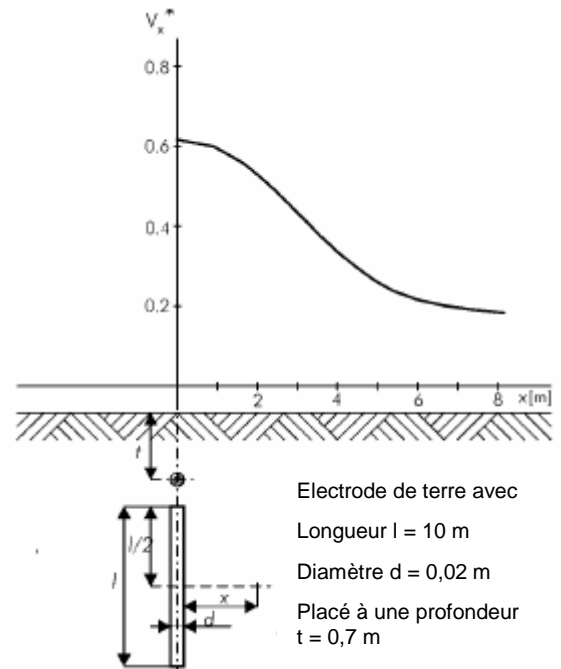


Figure 1 : Distribution du potentiel de terre surfacique, perpendiculaire à un piquet horizontal

La distribution du gradient de potentiel selon les formules 4 et 4a est présentée à la figure 1, pour des dimensions particulières de l'électrode de terre.

La résistance de terre d'un simple tube placé dans le sol peut être calculée par la formule suivante :

$$R = \frac{V_E}{I_E} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{td} \quad (5)$$

Les électrodes de terre horizontales sont généralement des méplats de section rectangulaire, d'une largeur de 30-40 mm (b) et d'une épaisseur de 4-5 mm (c). dans ce cas, le diamètre équivalent d_e peut être calculé par :

$$d_e = \frac{2b}{\pi} \quad (6)$$

et remplacé dans la formule (5). Dans certains documents, on accepte l'hypothèse que $d = b/2$.

La résistance pour différentes constructions d'électrodes de terre simples placées horizontalement peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l_E} \ln \frac{Bl^2}{td_e} \quad (7)$$

où B est un facteur dépendant de la conception de l'électrode (donné dans le tableau 1) et l_E la somme des longueurs de tous les éléments de l'électrode.

La résistance d'une électrode de terre en forme de boucle de diamètre D, constituée par un méplat d'épaisseur c (figure 2), placée à une profondeur typique sous la surface du sol $t = 1\text{m}$ peut être calculée en utilisant la formule suivante [4] :

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

où k est le facteur donné à la figure 3 (les grandeurs sont définies à l'équation (4)).

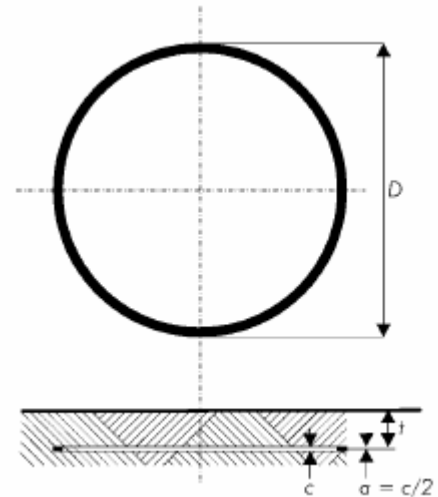


Figure 2 – Schéma d'une électrode de terre simple en boucle, selon l'équation (8)

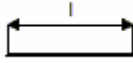




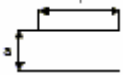


Electrode de terre		Facteur B dans la formule [7]	
Nom	Projection horizontale		
En ligne		1	
2 brins, perpendiculaires		1,46	
3 brins, symétriques		2,38	
4 brins, symétriques		8,45	
6 brins, symétriques		192	
2 brins, parallèles		$\frac{l^2}{4a^2}$	
Carré		5,53	
Rectangles, avec différents rapports l_1/l_2 (1,5 ; 2 ; 3 ; 4)		1,5	5,81
		2	6,42
		3	8,17
		4	10,4

Tableau 1 – Valeurs du facteur B (7) pour différentes formes géométriques d'électrodes de surface

Les piquets de terre verticaux sont de longues baguettes ou tubes métalliques placés verticalement dans le sol afin de traverser les couches profondes du sol. Comme cela est indiqué dans le module 6.3.1, la résistivité d'une prise de terre dépend principalement de sa profondeur dans le sol du fait de l'importante humidité du sol au niveau des couches profondes. Les piquets assurent un contact avec les couches profondes là où l'humidité est plus importante et la résistivité plus faible, c'est pourquoi ils sont particulièrement utilisés pour la conception de prise de terre sur une petite surface au sol. En conséquence, ce type d'électrode est recommandé spécialement dans les zones de forte densité de bâtiments ou lorsque le sol est couvert de béton ou d'asphalte. Les électrodes de terre verticales sont

également utilisées en complément d'électrodes horizontales afin de diminuer la résistance totale de la prise de terre.

Cependant, un inconvénient majeur des électrodes verticales simples est le mauvais gradient de potentiel, qui peut être calculé avec la formule suivante, en admettant que le courant de terre I_E est uniformément distribué sur toute la longueur du piquet :

$$V_x = \frac{\rho I_E}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{\sqrt{x^2 + l^2} - l} \quad (9)$$

où : x = distance de l'électrode
 l = longueur de l'électrode

les autres paramètres sont explicités à l'équation (4).

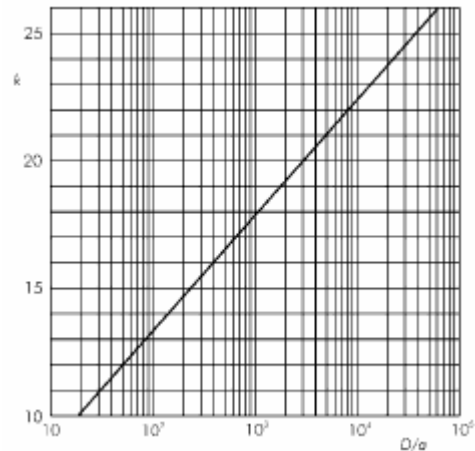


Figure 3 – diagramme du facteur $k = f(D/a)$ Utilisé dans l'équation (8)

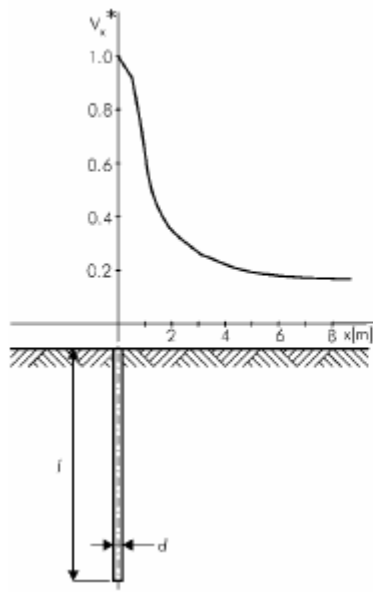


Figure 4 – distribution de potentiel $V_x^* = f(x)$ autour d'une électrode verticale de longueur $l = 3$ m et de diamètre $d = 0,04$ m

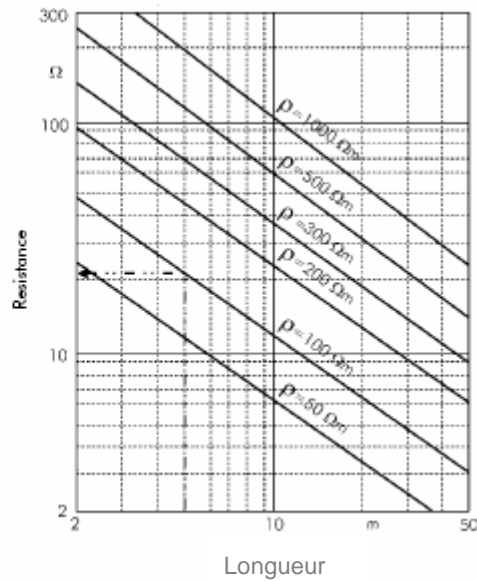


Figure 5 – résistance de terre (résistance de dissipation) d'un piquet de longueur l et de diamètre $0,02$ m dans un sol homogène de résistivité ρ [2]

Un exemple de gradient de potentiel relatif $V_x^* = f(x)$ (4a), pour des électrodes verticales est présenté en figure 4. La comparaison des caractéristiques des figures 1 et 4 montre que le

gradient de potentiel à la surface du sol est considérablement plus élevé pour une électrode verticale et la tension de contact est plus défavorable. Une relation approximative de la résistance d'une électrode de terre verticale est :

$$R = \frac{V_E}{I_E} = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{4l^2}{r^2} \quad (10)$$

où r est le rayon du piquet.

La Figure 5 montre la résistance en fonction de la longueur du piquet pour différentes résistivités de sol.

Dans le cas de n électrodes verticales (Figure 6) placées parallèlement les unes des autres et équidistantes de a , la résistance effective de la prise de terre est, selon [4,8] :

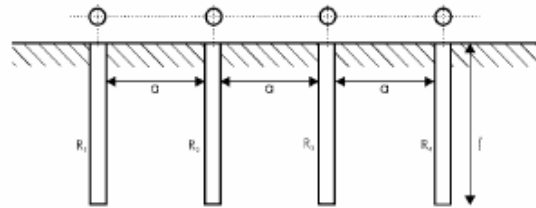
$$\frac{1}{R} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right) k \quad (10a)$$

où :

$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ sont les résistances de terre calculées pour chaque piquet, en admettant que chaque piquet n'est pas affecté par la présence des autres et :

k est un facteur appelé coefficient de "remplissage" ou de "service", avec $k \geq 1$

La valeur de k est supérieure à 1 du fait de l'influence mutuelle des champs électriques produits par des piquets adjacents. En effet, la symétrie du débit de courant de chaque électrode est déformée et la densité de courant dans le sol est changée. Dans la publication [8], les valeurs exactes de ce facteur k sont indiquées pour différentes configurations d'électrodes placées parallèlement. Dans une configuration simple comme décrit à la figure 6, les valeurs suivantes de k peuvent être admises [4] :



**Figure 6 - piquets placés en parallèle ;
 $R_1 - R_4$ - résistance individuelle de chaque piquet,
 a - distance entre piquets, l - longueur d'un piquet**

Pour $a \geq 2l$, $k \approx 1,25$ et pour $a \geq 4l$, $k \approx 1$

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

$$R = \frac{\rho}{4r_e} + \frac{\rho}{l_{\Sigma}} \quad (11)$$

où r_e est le rayon équivalent.

Pour des surfaces carrées, ou approximativement carrées, le rayon équivalent est celui qui correspond à une aire circulaire de même surface que le carré.

Pour des surfaces rectangulaires, le rayon équivalent est égal à la somme des côtés externes divisée par π , si les électrodes forment un très long rectangle, (figure 7b) avec $l_E =$ somme des longueurs des flancs de toutes les mailles à l'intérieur de la grille.

Les électrodes de terre de fondations sont des conducteurs métalliques enrobés dans le béton des fondations du bâtiment. Le béton coulé directement dans le sol possède une humidité naturelle et peut être considéré comme une matière conductrice, avec une conductivité similaire à celle du sol. Du fait de la grande surface de ce type d'électrode, une faible résistance peut être atteinte. De plus, le béton protège les parties métalliques contre la corrosion et les éléments en acier enrobés dans le béton ne nécessitent pas une protection supplémentaire anti-corrosion. Les électrodes de terre de fondation sont actuellement recommandées comme solution pratique pour les prises de terre de bâtiment [6, 7].

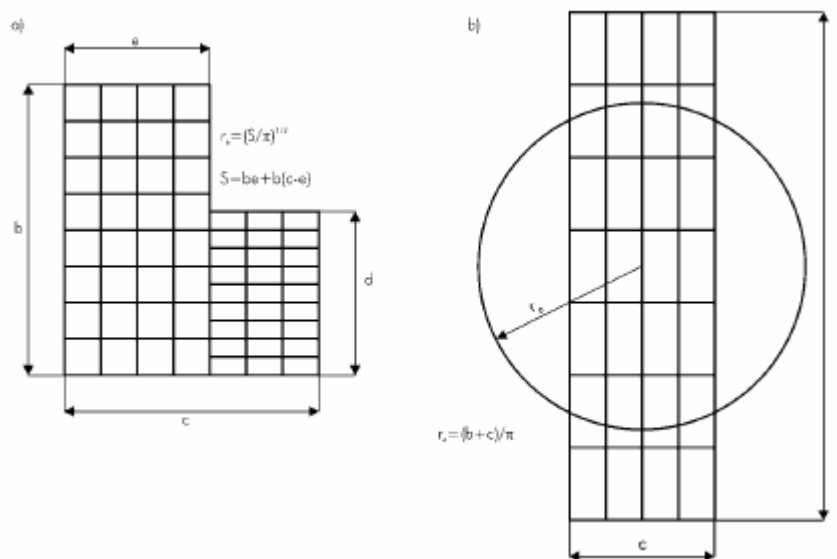


Figure 7 – Exemples d'électrodes de terre maillées expliquant la méthode de calcul du rayon équivalent r de l'équation (11) pour deux formes d'électrodes, l'une à peu près carrée (a), l'autre étant un long rectangle (b)

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

- dans des fondations en béton non armé (Figure 8),
- dans des fondations en béton armé (Figure 9).

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

- méplat acier de section rectangulaire pas inférieure à 30 mm x 3,5 mm, ou
- barre d'acier de section cylindrique d'un diamètre d'au moins 10 mm.

Les éléments en acier peuvent être galvanisés (c'est-à-dire avec une couche de zinc), mais ce n'est pas nécessaire si la couche de béton recouvrant l'électrode est supérieure à 50 mm

[6], puisque le béton assure une protection suffisante contre la corrosion, comme le montre la figure 8.

Dans des fondations en béton non armé (Figure 8), l'électrode suit généralement le profil des fondations du bâtiment, c'est-à-dire qu'elle est placée en dessous des murs porteurs. Dans les bâtiments ayant de vastes fondations, l'électrode est généralement réalisée en forme de boucle ; elle recouvre la partie extérieure des fondations et est totalement interconnectée.

Dans des fondations en béton armé, l'électrode de terre est placée en-dessous de la plus profonde armature (Figure 9), assurant ainsi une protection adéquate de l'électrode contre la corrosion. L'électrode peut être fixée à l'armature métallique du béton par des brins de câble à des intervalles jamais supérieures à 2 m de plus que la longueur de l'électrode. Il n'est pas nécessaire d'assurer une connexion électrique sûre à chaque point puisque la connexion électrique principale se fait via le béton. Si les fondations sont réalisées en panneaux séparés les uns des autres par des joints de dilatation, les électrodes de terre de chaque panneau seront connectées galvaniquement les unes aux autres. Ces connexions doivent être flexibles et doivent être repérées afin d'être accessible en cas de besoin de mesures ou de maintenance [6].

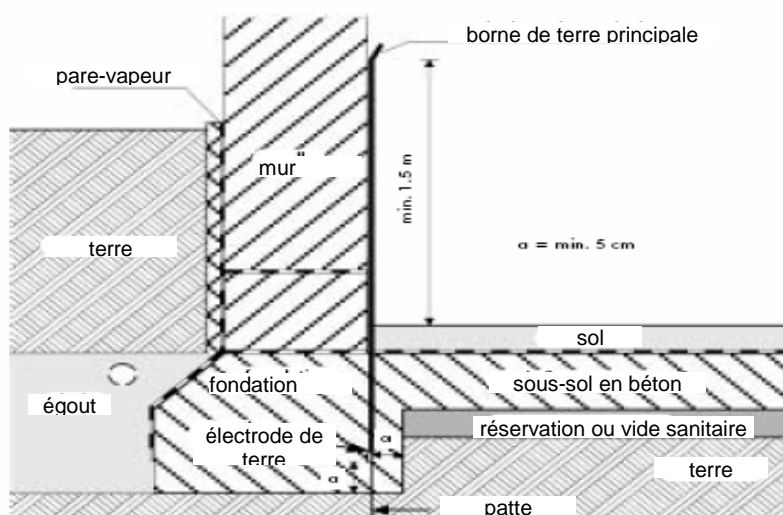
La résistance d'une prise de terre de fondation peut être calculée en utilisant la formule simplifiée suivante [2] :

$$R = 0.2 \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} \quad (12)$$

où : R est exprimé en Ω

V est le volume des fondations en m^3 .

L'extrémité de l'électrode de terre de fondation doit avoir une longueur minimale de 150 cm au dessus du niveau du sol (Figures 8 et 9). Elle doit être placée aussi près que possible de la barrette principale d'équipotentialité de l'installation. La connexion de cette électrode avec la protection contre la foudre doit être réalisée à l'extérieur du bâtiment.



**Figure 8 –
Illustration du
positionnement
d'une électrode de
terre de fondation
dans des
fondations sans
béton armé**

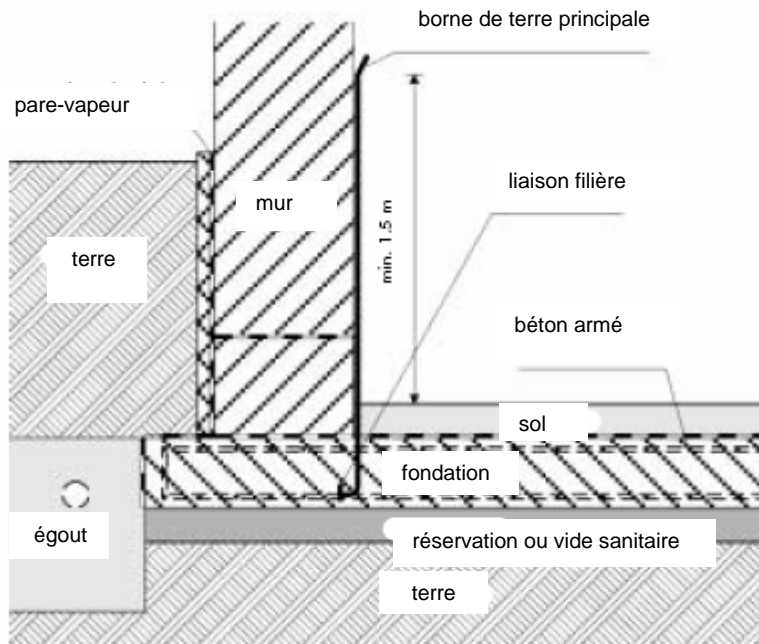


Figure 9 – Illustration du positionnement d'une électrode de terre de fondation dans des fondations en béton armé

Des logiciels sont maintenant disponibles permettant un calcul exact des paramètres pour différentes structures de prise de terre, incluant les structures complexes des couches géologiques. Toutefois, il présente un intérêt limité puisque les structures géologiques du sol, la résistivité du sol et leurs modifications dans le temps ne sont pas connues en pratique. Un calcul exact peut être entrepris uniquement pour une certaine période de l'année, et le résultat pourra être sensiblement différent à un autre moment. Dans tous les cas, cependant, une grande précision n'est pas nécessaire pour ce type de calcul : en pratique, une précision de $\pm 30\%$ est généralement satisfaisante. Par conséquent, l'utilisation des formules simplifiées énoncées dans ce module est suffisante. Naturellement, lorsque le résultat est essentiel pour la conception, l'efficacité du système ne peut être vérifiée que par la mesure de la résistance de la prise de terre après sa construction.

4 Exemples numériques

Dans tous les exemples suivants, il est admis que le sol est de structure homogène, avec une résistivité $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Exemple A)

La résistance d'une électrode simple, placée horizontalement à une profondeur de 1 m ayant les dimensions suivantes :

Largeur $b = 40$ mm

Epaisseur $c = 5$ mm

Longueur $l = 5$ m

peut être calculée en utilisant les formules (6), (7) et le tableau 1. Le diamètre équivalent de (6) est le suivant :

$$d_e = \frac{2b}{\pi} = \frac{2 \times 0.04m}{\pi} = 0.025m \quad (\text{d'après le tableau 1, le facteur B est égal à 1})$$

La résistance de la prise de terre vaut :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l \Sigma} \ln \frac{Bl^2}{td_e} = \frac{100\Omega m}{2 \times \pi \times 5m} \ln \frac{1 \times 5^2 m^2}{1m \times 0.025m} \approx 22\Omega$$

Exemple B)

Une électrode constituée de deux tubes positionnés en croix symétrique (tableau 1) a les paramètres suivants :

$d_e = 0,025$ m

$l = 2,5$ m

$B = 8,45$

La résistance de la prise de terre vaut :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l \Sigma} \ln \frac{Bl^2}{td_e} = \frac{100\Omega m}{2 \times \pi \times 10m} \ln \frac{8.45 \times 2.5^2 m^2}{1m \times 0.025m} \approx 12.2\Omega$$

Exemple C)

Une électrode placée en boucle horizontale (figure 2) à 1 m de profondeur, de diamètre $D = 5$ m, est réalisée avec la même bande que dans l'exemple A. Le facteur k de la figure 3 peut être évalué pour $D/a = 5/0,0025 = 2000$, et $a = c/2$, d'après la figure 2. La résistance de la prise de terre peut être calculée en utilisant la relation (8) :

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} k = \frac{100\Omega m}{2 \times \pi^2 \times 5m} \times 19.2 \approx 19.4\Omega$$

Exemple D)

Un piquet de terre placé verticalement, d'un diamètre de 20 mm et d'une longueur de 5 m, a une résistance calculée d'après l'équation (10) :

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{4l^2}{r^2} = \frac{100\Omega m}{4 \times \pi \times 5m} \ln \frac{4 \times 5^2 m^2}{0.01^2 m^2} \approx 21.9\Omega$$

Une valeur équivalente peut être lue sur le diagramme de la figure 5.

Exemple E)

Une électrode de terre rectangulaire maillée placée horizontalement a les dimensions indiquées à la figure 10.

La résistance est calculée en utilisant la formule (11) et le diamètre équivalent r_e est calculé comme cela est montré à la figure 7.

$$r_e = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4m \times 4.5m}{\pi}} \approx 2.4m$$

la somme des longueurs d'une maille est :

$$(1,5 m + 1m) * 2 = 5 m$$

la somme des longueurs de toutes les mailles de la grille est :

$$l_{\Sigma} = 5 m \times 12 \text{ mailles} = 60 m$$

donc, la résistance de cette électrode de terre est

$$R = \frac{\rho}{4r_e} + \frac{\rho}{l_{\Sigma}} = \frac{100\Omega m}{4 \times 2,4m} + \frac{100\Omega m}{60m} = 12,1\Omega$$

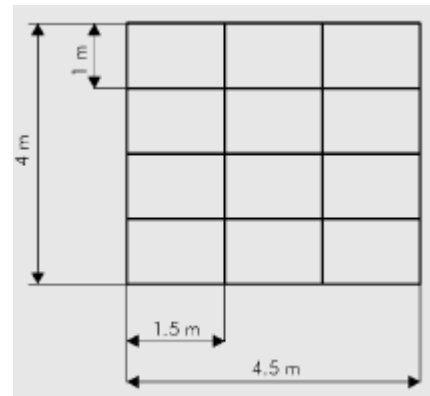


Figure 10 : schéma de l'électrode de terre maillée (exemple E)

5 Aspects constitutifs des électrodes de terre

Les prises de terre devront être construites selon les règles de l'art, et avec des matériaux tels qu'elles remplissent correctement leur rôle tout au long de leur durée de vie, et cela pour un coût raisonnable. Les propriétés requises sont les suivantes :

- faible résistance de terre et bon gradient de potentiel de surface,
- dimensionnement adapté au courant à évacuer,
- longévité.

La résistance de terre ne doit pas dépasser les valeurs exigées par les normes ou les recommandations dans les conditions climatiques les plus défavorables (longue période sèche, fortes gelées). En l'absence de demandes précises, cette résistance de terre devra être la plus faible possible.

Le gradient de potentiel de surface doit être tel que les tensions de contact et de pas ne dépassent pas les valeurs admissibles. Le gradient de potentiel de surface le plus favorable est obtenu en utilisant une électrode de terre maillée placée horizontalement. Il est parfois nécessaire d'ajouter des éléments horizontaux afin d'atteindre le gradient de potentiel de surface désiré. Ces points ont été abordés dans le module 6.3.1 "Mise à la terre – Bases de calcul et de conception".

Le courant à évacuer est la valeur maximale de courant pouvant circuler dans la prise de terre sans créer un échauffement excessif des éléments de la prise de terre ni du sol environnant. Pour des valeurs trop élevées de courant et de densité de courant, l'humidité du sol au niveau de l'électrode s'évapore, laissant un sol sec de résistivité plus importante.

La longévité de la prise de terre est sa durée de vie depuis sa construction jusqu'au moment où, du fait de la corrosion des parties métalliques, la continuité électrique n'est plus assurée. La longévité d'une prise de terre peut excéder la durée de vie supposée de l'installation électrique. Pour la majorité des installations électriques, la durée de vie peut dépasser 25 ans et, dans le cas du réseau de distribution, 35 – 50 ans. La prise de terre doit être incluse dans les prévisions de maintenance et de réparation.

La longévité d'une prise de terre dépend principalement de sa capacité à résister à la corrosion. Les électrodes de terre, étant directement en contact avec le sol ou avec de l'eau, sont dans des conditions défavorables vis à vis de la corrosion. Il y a trois facteurs principaux déterminant le taux de corrosion d'un objet métallique dans le sol :

- les courants continus circulant dans la terre,
- la contamination chimique du sol,
- les phénomènes électrochimiques (galvaniques) entre différents métaux situés dans le sol.

La corrosion ayant pour origine **les courants continus** survient principalement à proximité de réseaux continus (par exemple, les alimentations des voies ferrées). Il existe des normes et des règles (par exemple la DIN VE 0150) précisant les conditions à satisfaire dans de tels cas.

La corrosion ayant pour origine **les substances chimiques présentes dans le sol** est habituellement peu importante et affecte seulement les systèmes des industries chimiques, ou localisés près des océans. Dans de tels cas, les électrodes formant la prise de terre doivent être en métaux résistant à la corrosion chimique. Afin de minimiser la corrosion chimique, il est recommandé, dans certains cas, de mesurer le pH du sol. Pour un sol alcalin, (pH > 7) les électrodes en cuivre sont recommandées et pour les sols acides, les électrodes en aluminium, en zinc ou en acier galvanisé sont privilégiées.

La corrosion galvanique est causée par un courant continu circulant dans un circuit alimenté par la différence de potentiel existante entre deux pièces métalliques dans un sol humide qui, dans ce cas, agit comme un électrolyte. L'électrode communément utilisée est en cuivre et a le plus petit potentiel. Les autres métaux ont des potentiels positifs, par rapport au potentiel du cuivre (tableau 2). Ce petit courant continu circulant continuellement génère une circulation des ions métalliques de l'anode vers la cathode. Ainsi, de la matière est perdue par l'anode et s'accumule sur la cathode. De ce point de vue, les combinaisons propices peuvent être déduites. Par exemple, de l'acier recouvert de cuivre est une bonne solution car la quantité de cuivre reste la même. L'exemple opposé est de l'acier recouvert de zinc car le zinc est toujours à l'anode, et sa quantité diminue continuellement. Il est à noter que le potentiel électrochimique de l'acier enrobé dans du béton est très proche de celui du cuivre. Ainsi, les parties en acier des fondations des bâtiments sont des cathodes par rapport aux autres pièces en acier ou en zinc situées dans le sol (non seulement les électrodes de terre, mais aussi les réseaux d'eau par exemple). Cela signifie que de grandes fondations causent une corrosion significative de ces objets métalliques par réaction électrochimique.

Métal	Potentiel électrochimique par rapport à une électrode de cuivre (V)
Zinc, ou acier recouvert de zinc	0,9 – 1,0
Acier	0,4 – 0,7
Acier dans du béton	0 – 0,3

Tableau 2 – Valeurs de potentiel électrochimique de différents métaux par rapport à une électrode de cuivre [2]

Les matériaux les plus fréquemment utilisés pour les électrodes sont :

- l'acier (par exemple, pour les prises de terre de fondation),
- l'acier galvanisé,
- l'acier recouvert de cuivre,
- les alliages à forte teneur en acier,
- le cuivre et les alliages de cuivre.

La résistance mécanique et les conditions de corrosion déterminent les dimensions minima pour les types d'électrode de terre indiquées au tableau 3 [5].

Matériaux		Type d'électrode	Taille minimum				
			Ame			Enveloppe	
			Diamètre (mm)	Section (mm)	Epaisseur (mm)	Donnée isolée (µm)	Valeurs moyennes (µm)
Acier	Galvanisé à chaud	Méplat ²⁾		90	3	63	70
		Profilé		90	3	63	70
		Tube	25			47	55
		Piquet rond	16			63	70
		Câble rond pour électrode de terre horizontale	10				50
	Avec gaine de plomb ¹⁾	Câble rond pour électrode de terre horizontale	8			1000	
	Avec gaine de cuivre extrudé	Piquet rond	15			2000	
	Avec enveloppe de cuivre électrolysé	Piquet rond	14,2			90	100
Cuivre	Nu	Méplat		50	2		
		Câble rond pour électrode de terre horizontale		25 ³⁾			
		Câble toronné	1,8 ⁴⁾	25			
		Tube	20		2		
	Etamé	Câble toronné	1,8 ⁴⁾	25		1	5
	Galvanisé	Méplat		50	2	20	40
	Avec gaine de plomb ¹⁾	Câble toronné	1,8 ⁴⁾	25		1000	
		Câble rond		25		100	
<p>1) non utilisable directement noyé dans le béton</p> <p>2) méplat, dont les extrémités sont découpées sous forme arrondie</p> <p>3) Dans des conditions spécifiques, lorsque l'expérience montre que le risque de corrosion et de défaut mécanique est extrêmement faible, du 16 mm² peut être utilisée</p> <p>4) par brin du toron</p>							

Tableau 3 – Type et dimensions minimum des matériaux des électrodes de terre assurant une solidité mécanique et une résistance à la corrosion [5]

Du fait du besoin en résistance mécanique et en stabilité face à la corrosion, les sections minimales des conducteurs de terre sont [5] :

- Cuivre 16 mm²
- Aluminium 35 mm²
- Acier 50 mm²

6 Conclusions

Lors de la réalisation d'une prise de terre, les points suivants sont à prendre en considération :

- fonction,
- propriétés électriques,
- matériau.

Les principales propriétés électriques d'une prise de terre sont :

- la résistance de terre,
- le gradient de potentiel en surface du sol,
- la capacité d'écoulement du courant.

La distribution de potentiel la plus favorable est obtenue avec des électrodes horizontales, en particulier si elles sont maillées, ce qui permet de contrôler le potentiel de surface assez facilement. Dans le cas des électrodes verticales, le gradient de potentiel est le plus défavorable et cela génère les plus importantes valeurs de tension de contact. D'un autre côté, l'utilisation des électrodes verticales permet d'atteindre facilement des valeurs faibles et stables de résistance de terre, ne dépendant pas significativement des conditions climatiques. Les électrodes verticales sont également utilisées combinées avec des électrodes horizontales afin d'atteindre de plus faibles valeurs de résistances de terre.

Le choix du matériau constitutif de l'électrode de terre est habituellement un compromis entre le coût et la longévité de cette électrode. La corrosion du matériau et l'agressivité de la corrosion sont les facteurs principaux limitant la durée de vie de la prise de terre.

7 Références et bibliographies

- [1] IEC 364-5-54, Electrical installations of buildings
- [2] Rudolph W, Winter O, EMV nach VDE 0100, VDE-Schriftenreihe 66, VDE-Verlag GmbH. Berlin, Offenbach, 1995
- [3] ABB Switchgear Manual, 10th edition, Düsseldorf, Cornelsen Verlag 1999
- [4] Batz H et al, Elektroenergieanlagen, VEB Verlag Technik Berlin, 1989

- [5] HD 637 S1 (Harmonisation Document) "Power installations exceeding 1 kV a.c."
- [6] RWE Energie Bau-Handbuch, 12th Edition, Editor: Hauptberatungsstelle für Elektrizitätsanwendung, HEA-e.V
- [7] DIN 18014, Fundamenterder, Berlin, Beuth Verlag
- [8] Wolkowski K, Uziemienia urzaden elektroenergetycznych (Earthing systems of electrical power devices), in Polish, Warsaw, WNT, 1967