

MESURES ÉLECTRIQUES

Mesurer une résistance de terre... même sans rien déconnecter

▼ Pour éviter tout risque d'électrocution ou de détérioration dû à un défaut d'isolement, les équipements électriques doivent être mis à la terre. Encore faut-il s'assurer que les prises de terre soient de qualité et qu'elles conservent leurs caractéristiques dans le temps. Il existe des instruments spécialisés pour cela. Mais ce qui importe surtout, ce sont les conditions de mesure, c'est-à-dire les caractéristiques de l'installation. Celle-ci peut-elle être mise hors tension ? Est-il possible de déconnecter la prise de terre ? La prise de terre à mesurer est-elle seule ou reliée à d'autres ? A chaque situation sa procédure de mesure.

Le rôle des prises de terre est avant tout de protéger les personnes contre les éventuels défauts d'isolement des équipements sous tension. La prise de terre assure également la protection des équipements et des installations. Elle accroît la fiabilité des équipements et réduit le risque de détérioration en cas de foudre ou de courant de défaut. Encore faut-il que la prise de terre soit de bonne qualité. Ce qui caractérise une prise de terre, c'est son impédance. Plus elle est faible, mieux c'est. Il est donc important de connaître la valeur de cette impédance, ne serait-ce que pour calibrer les dispositifs de protection différentiels (disjoncteurs ou interrupteurs) dont les courants nominaux sont choisis en fonction des caractéristiques de la prise de terre (selon la norme NFC 15-100). Au fait, qu'est-ce qu'une prise de terre ?

Selon l'Union Technique de l'Électricité (UTE), la prise de terre est « une connexion conductrice intentionnelle, ou non intentionnelle, entre un circuit électrique ou un équipement doté d'une terre et un corps conducteur servant de terre ». Concrètement, une prise de terre se compose d'un conducteur de terre, d'un contact entre le conduc-

teur de terre et l'électrode et d'une électrode (piquet de terre, câble en cuivre nu enterré, feuillard en acier...). Lors de l'installation d'un dispositif de mise à la terre, en plus des caractéristiques de l'électrode, on doit également prendre en compte la nature du sol (argile, sable, béton, roche...), le taux d'humidité et la température de ce dernier pour déterminer la zone ayant la résistance de terre la plus faible, même dans les conditions d'environnement les plus défavorables. Pour définir le site adéquat, on a alors recours à la mesure de la résistivité des sols. Cette mesure est également utilisée pour dimensionner et choisir le dispositif de mise à la terre (piquet de terre ou feuillard, par exemple).

Mesure de la résistivité des sols par la méthode de Wenner

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité des sols est celle des quatre électrodes (voir encadré "Mesure de la résistivité des sols"). Pour connaître à l'aplomb d'un point O la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on génère un courant I entre deux piquets de terre X et Z, disposés symétriquement par rapport au point O. On prévoit deux électrodes supplémentaires Y et X_v, au voisinage du point O et à égale distance de celui-ci, pour

mesurer la différence de potentielle ΔV . Il est alors possible de calculer la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point O à partir de la résistance donnée par un ohmmètre de terre.

En pratique, il faut donc connaître la distance entre chaque piquet de terre pour chaque mesure réalisée, ce qui complique la procédure.

Variante de la méthode des quatre électrodes, la **méthode de Wenner** simplifie cette tâche. Elle impose un positionnement précis des électrodes les unes par rapport aux autres. On dispose les quatre piquets de terre en ligne, en les espaçant de manière équidistante (distance A allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres), selon un intervalle qui dépend de la profondeur p à tester. D'autre part, les électrodes ne doivent pas être enfoncées de plus du tiers de la distance qui les sépare. Prenons un exemple. On souhaite installer un dispositif de mise à la terre en utilisant des prises de terre pénétrant à 3 m de profondeur. Pour déterminer la résistivité du sol à cette profondeur, il faut placer les quatre électrodes de mesure à une distance de $A=4/3.p$, c'est-à-dire de



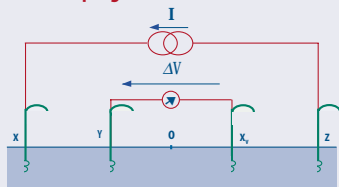
Le moindre défaut dans un dispositif de mise à la terre peut avoir des conséquences dramatiques sur les personnes et les biens. Pour éviter cela, il existe différentes méthodes pour contrôler et mesurer résistivité des sols et résistances de terre... en fonction du type de mesure et de la place disponible.

Quelques repères

- ▶ Il faut connaître la valeur de la résistance de terre pour calculer les dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).
- ▶ La mesure de la résistance des sols permet de choisir le meilleur emplacement pour les prises de terre.
- ▶ Idéalement, la mesure de la prise de terre se fait en déconnectant celle-ci de son environnement.
- ▶ Lorsque la prise de terre ne peut pas être déconnectée, il existe d'autres alternatives.

Mesure de la résistivité des sols

Principe général de la méthode



La méthode de Wenner permet de connaître, à l'aplomb d'un point O, la résistivité des sols en fonction de la profondeur. On génère un courant I entre deux piquets de terre X et Z, disposés symétriquement par rapport au point O. On prévoit deux électrodes supplémentaires Y et X_v, au voisinage du point O, pour mesurer la différence de potentiel ΔV. Il est alors possible de calculer la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point O à partir de la résistance donnée par un ohmmètre de terre.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{ZY} - \frac{1}{YX} - \frac{1}{ZX_v} + \frac{1}{X_vX}} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

où ρ est la résistivité [exprimée en Ω.m], ZY, YX, ZX_v, et X_vX sont les distances entre les quatre sondes [en m] et ΔV/I = R est la résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre [en Ω].

Méthode de Wenner

Par rapport à la méthode classique à quatre électrodes, la méthode de Wenner impose un positionnement précis des électrodes les unes par rapport aux autres : en ligne et équidistantes (distance A), ce qui simplifie la formule de la résistivité apparente :

$$\rho = 2\pi \cdot A \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

où :

ρ : résistivité [Ω.m]

A : distance entre les sondes [m]

ΔV/I = R : résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre [Ω]

4 m, les unes des autres, et à une profondeur de 20 cm seulement (bien inférieure à A/3, soit 1,67 m).

Comme dans la méthode à quatre électrodes, on injecte un courant constant entre les deux piquets extrêmes et on mesure, entre les deux piquets intérieurs, la chute de potentiel due à la résistance de terre. La formule générale donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches de terrain situées sous le point de mesure s'en trouve simplifiée (voir encadré "Mesure de la résistivité des sols").

La résistivité apparente calculée par la méthode de

Wenner est une moyenne des résistivités réelles du terrain, chaque valeur étant pondérée par la densité de courant à la profondeur considérée.

Tout n'est pas aussi simple en pratique. Les mesures sont souvent faussées par l'influence d'éléments métalliques présents dans le sol. C'est pourquoi il est recommandé de renouveler les mesures de résis-

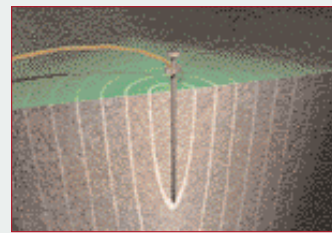
Pourquoi effectuer une mise à la terre ?

Les prises de terre servent essentiellement à assurer la protection des personnes, des installations et des équipements. Elles constituent en outre un moyen de dérivation efficace des courants de défaut, des coups de foudre, des décharges électrostatiques, des perturbations électromagnétiques et des interférences haute fréquence.

En pratique, on ne sait pas exactement ce qui fait qu'une prise de terre est bonne ni quelle est la résistance qu'elle devrait avoir. L'idéal serait que la valeur de la résistance de terre soit de 0 Ω, mais cela n'arrive jamais. Tout d'abord, la résistance de la prise de terre et celle de la ligne de raccordement sont en général très faibles, mais non nulles. Les piquets de terre sont fabriqués avec un matériau ayant une conductivité élevée et une faible impédance. Il en est de même pour la résistance de contact entre l'électrode et la terre, à condition que l'électrode ne soit pas peinte ou recouverte de graisse et qu'elle assure un bon contact avec le sol. C'est surtout la résistance du terrain environnant qui est la plus importante. L'électrode de mise à la terre est entourée de couches de terre concentriques de même épaisseur et formant des cônes (voir photo). Les cônes qui sont les plus proches de l'électrode ont la surface la plus réduite et donc la résistance la plus grande. Plus l'on s'éloigne, plus la surface du cône est importante et plus sa résistance est faible. Ce phénomène persiste jusqu'à ce que les derniers cônes ne présentent plus qu'une résistance très faible par rapport à la terre qui entoure l'électrode.

S'adapter à la nature du sol, à l'humidité et à la température

Pour obtenir une résistance de terre qui soit à la fois la plus basse possible et en même temps la moins coûteuse, l'utilisateur peut jouer sur différents paramètres. Il peut déjà augmenter le diamètre de l'élec-



trode de mise à la terre bien que cela n'entraîne qu'une réduction minime de la résistance : doubler le diamètre de la prise de terre ne permet pas de réduire la résistance de plus de 10%. Pour réduire la résistance de terre, il existe une méthode plus efficace. Elle consiste à enfoncer davantage l'électrode dans le sol. Celui-ci se présentant sous forme de strates (couches géologiques), la résistance varie sensiblement d'une strate à l'autre en fonction de la profondeur. En doublant la longueur de l'électrode, on obtient en général une diminution de la résistance de 40 %.

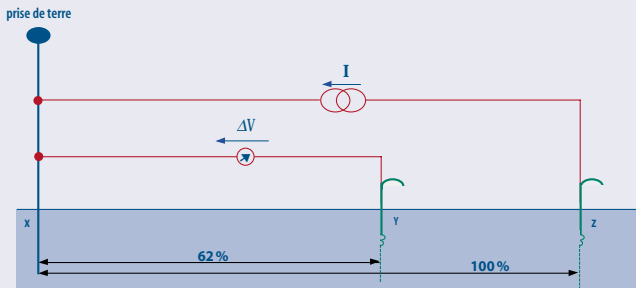
Le sol constitué de strates est donc rarement homogène. Il peut y avoir des variations considérables. La meilleure méthode pour réduire la résistance consiste à utiliser plusieurs prises de terre que l'on branche en parallèle. Selon l'UTE (Union Technique de l'Électricité), il faut ajouter une prise de terre supplémentaire lorsque l'on a une prise de terre individuelle (piquet, tube ou plaque) qui ne descend pas en dessous de 25 Ω. En procédant de la sorte, on répond aux exigences de l'UTE, mais cela ne signifie pas pour autant que la résistance va descendre en dessous de 25 Ω. Les exigences sont souvent très différentes : la norme DIN VDE impose moins de 10 Ω, les sociétés de télécommunications recommandent 5 Ω voire moins.

Il faut également veiller à la disposition des prises de terre. Chacune est en effet entourée d'un champ de potentiel. Pour que les prises de terre voisines puissent être efficaces, il faut que la distance qui les sépare soit au moins égale à la profondeur de pénétration. Si cette distance est insuffisante, les champs s'influencent mutuellement et il n'y aura pratiquement pas d'amélioration de la résistance de terre. ■

tivité en déplaçant les quatre piquets de terre pour former un nouvel alignement perpendiculaire au premier. On peut aussi faire varier la profondeur et la distance entre les sondes de mesure afin d'obtenir des profils de résistivité. Des courants parasites qui circulent dans la terre peuvent également perturber les mesures de

Mesure de résistances de terre selon la méthode à 3 pôles

Principe de la mesure (méthode des 62%)



Comme son l'indique, la méthode de mesure à trois pôles repose sur trois éléments. Le premier est une prise de terre (X), les deux autres sont des piquets de terre. Le piquet situé le plus loin de la prise de terre assure le bouclage du courant I généré par l'ohmmètre de terre : c'est la sonde auxiliaire ou terre auxiliaire (Z). Le deuxième piquet est la sonde de tension (Y) qui permet de mesurer la différence de potentiel ΔV par rapport à la prise de terre. La sonde de tension doit être positionnée entre la prise de terre et la sonde auxiliaire selon la règle des 62 %. Cette règle qui consiste à placer la sonde de tension à 62 % de la distance XZ permet de s'assurer de se trouver en dehors des zones d'influence de chaque pôle et donc de réaliser une mesure assez précise. Connaissant la différence de potentiel et le courant, on calcule la résistance de terre à l'aide de la loi d'Ohm.

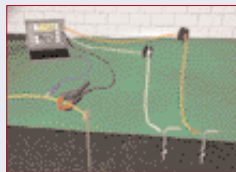
Méthode de mesure 3 pôles



La **méthode de mesure à 3 pôles** donne la valeur de la résistance de terre équivalente à toutes les prises de terre du système (résistance de terre globale). Pour obtenir la valeur de la résistance de terre individuelle, il faut donc déconnecter la prise de terre en question du dispositif.

La **méthode de mesure sélective** utilise une pince ampèremétrique en plus des deux piquets de mesure. Au lieu de prendre en compte le courant généré par le mesureur de terre, qui traverse donc tout le dispositif maillé, la pince ampèremétrique permet de mesurer le courant qui passe effectivement dans la prise de terre. On parvient ainsi à éliminer l'influence des autres prises de terre en parallèle.

Méthode de mesure sélective



résistivité des sols. Ce sont des courants telluriques, des courants de défaut et leurs harmoniques (fréquences du fondamental de 50 Hz ou de 16 2/3 Hz pour les réseaux de la RATP). Les mesureurs de terre haut de gamme disposent d'un filtre sélectif calé sur la fréquence du courant

généré (signal carré de 128 Hz, par exemple) permettant de s'affranchir des fréquences parasites.

Reste à mesurer la résistance de terre proprement dite. Ce paramètre est essentiel dans le choix des disjoncteurs différentiels, et même une fois que le dispositif de mise

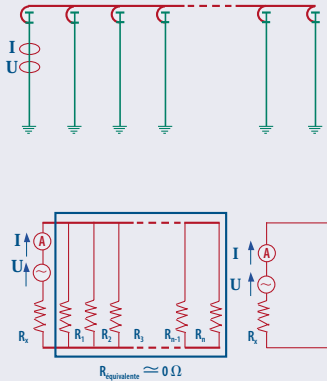
à la terre est en service. Il faut en effet le surveiller en raison, notamment, de la corrosion importante des prises de terre due à la présence d'eau et de sels dans les sols. Des campagnes de mesures doivent alors être effectuées périodiquement (au moins une fois l'an) afin de contrôler la bonne valeur des résistances de terre. Pour cela, on fait appel à la **méthode de mesure à trois pôles** (voir encadré "Mesure de résistances de terre selon la méthode à 3 pôles"). Le premier pôle est une prise de terre. Les deux autres pôles sont des piquets de terre : la sonde auxiliaire, qui assure le bouclage du courant généré par l'appareil, à l'extrémité et, entre les deux, la sonde de tension, qui mesure la différence de potentiel par rapport à la prise de terre. Pour s'assurer de se trouver en dehors des zones d'influence de chaque pôle et donc de réaliser une mesure assez précise, l'expérience montre que la sonde de tension doit être placée à 62 % de la distance prise de terre/sonde auxiliaire (règle des 62 %). On calcule alors la résistance de terre à l'aide de la loi d'Ohm.

Méthodes de mesure à 3 pôles

Pour obtenir le maximum de précision, il faut impérativement placer la sonde de tension en dehors de la zone d'influence de la prise de terre et de celle de la sonde auxiliaire. Faute de quoi, les mesures sont faussées. Pour s'assurer de la qualité de la mesure, on déplace la sonde de tension de 1 m environ dans toutes les directions et on renouvelle la mesure. Lorsque tous les relevés donnent approximativement le même résultat, c'est que la distance entre les sondes est suffisante. Si ce n'est pas le cas, il faut éloigner les sondes de tension et auxiliaire de la prise de terre jusqu'à ce que les valeurs mesurées soient pratiquement identiques.

Bien souvent, un dispositif de mise à terre est constitué de plusieurs prises de terre branchées en parallèle ou en série. La méthode de mesure à trois pôles donne la valeur de la résistance de terre équivalente à toutes les prises de terre du système (résistance de terre globale). Pour obtenir la valeur de la résistance d'une prise de terre individuelle, il faut déconnecter cette prise de terre des autres. Mais surtout, cette méthode est peu pratique à mettre en œuvre dans de bonnes conditions. Il faut en effet s'assurer que pendant la déconnexion de la prise de terre à contrôler, le dispositif de protection (disjoncteur différentiel) continue à être opérationnel afin d'éviter tout risque d'électrocution de ceux qui travaillent sur le site. Pour éviter tout

Méthode sans piquet



Dans la méthode de mesure sans piquet, les piquets de terre sont remplacés par deux pinces ampèremétriques. La première pince génère une tension U , tandis que la deuxième pince mesure le courant I qui traverse effectivement la prise de terre contrôlée. Connaissant la

tension aux bornes de la résistance de terre et le courant qui la traverse, la loi d'Ohm permet de calculer la valeur de la résistance de terre individuelle et non celle de la résistance globale de l'ensemble du réseau maillé. En effet, toutes les autres résistances de terre en parallèle de la résistance individuelle correspondent à une résistance équivalente quasiment nulle.



risque, il faut donc arrêter l'alimentation électrique de l'installation (ou de la partie de celle-ci concernée par la prise de terre à contrôler). Ceci n'est en général pas envisageable. Il existe une méthode où il n'est plus nécessaire de déconnecter la résistance de terre. La **méthode de mesure sélective*** (voir encadré "Mesure de résistances de terre selon la méthode à 3 pôles") permet de vérifier la conductivité de terres individuelles, de systèmes maillés, de terres de fondation et d'autres systèmes de mise à la terre. Elle permet également de mesurer la résistance des prises de terre individuelles sur des systèmes complexes comportant des systèmes maillés ou des réseaux de grilles, tels que ceux utilisés pour les postes de distribution publique, pour les pylônes des lignes à haute tension comportant des câbles de garde et pour les installations industrielles à terres multiples. La mesure sélective utilise une pince ampèremétrique en plus des deux piquets de mesure. Au lieu de prendre en compte le courant généré par le mesureur de terre, qui traverse donc tout le dispositif maillé, la pince ampèremétrique permet de mesurer indi-

viduellement chaque courant qui passe dans chaque prise de terre. On parvient ainsi à éliminer l'influence des autres prises de terre en parallèle.

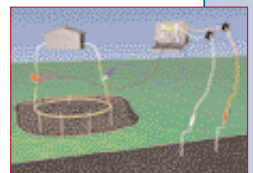
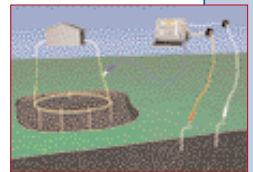
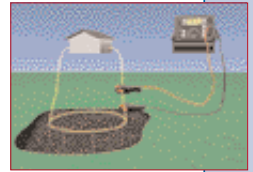
Mesures sans piquet de terre

Dans certaines situations (espace réduit, par exemple), il est difficile, voire impossible, de travailler selon la méthode classique des 3 pôles, c'est-à-dire de planter deux piquets de mesure sur une distance de plusieurs dizaines de mètres. Il existe la **méthode de mesure à 2 pôles**. Elle consiste à effectuer une mesure de la résistance de la prise de terre ou de la boucle de terre. Il faut connecter l'ohmmètre de terre à l'une des prises de terre, une fois déconnectée de l'installation de mise à la terre, et à une prise de terre de basse impédance, comme une conduite d'eau, par exemple. Cette méthode permet également de déterminer les résistances de couplage entre deux prises de terre.

La **méthode sans piquets** consiste à effectuer

Procédure de mesure de mise à la terre sur des installations existantes

Lors du contrôle d'une installation électrique, telle qu'un système de protection contre la foudre ou un concentrateur de lignes numériques, par exemple, il y a trois types de mesures à effectuer. Il faut d'abord contrôler par une mesure sans piquet que les prises de terre de l'installation sont bien raccordées. On ne mesure pas la résistance de terre individuelle, mais la résistance de boucle qui permet de vérifier la continuité des prises de terre et que ces mêmes prises de terre soient capables de dériver les courants de défaut. La seconde étape consiste à effectuer une mesure à trois pôles portant sur l'ensemble du système de mise à la terre (contrôle de la résistance de terre globale). Pour cela, il faut raccorder l'ohmmètre de terre à une prise de terre quelconque, en veillant à respecter les positions respectives de la sonde de tension et de la sonde auxiliaire (ou terre auxiliaire), définies par la méthode des 62 %. En dernier lieu, on s'intéresse à chaque résistance de terre. On utilise la méthode sélective par pince ampèremétrique pour vérifier ainsi la fiabilité de la prise de terre et l'homogénéité de la répartition équipotentielle.



Méthode à deux pôles



une mesure de résistance de boucle, sans planter de piquet. On mesure les différentes résistances de terre sur des installations de mise à la terre complexes à l'aide de deux pinces ampèremétriques.

Avec ce système, il n'est plus nécessaire de déconnecter les prises de terre parallèles, ce qui est dangereux et fastidieux, ni de rechercher la meilleure position pour les sondes. La méthode est basée sur le fait que dans les installations disposant de prises de terre multiples en parallèle, la résistance de terre effective globale est nettement inférieure à la résistance de terre individuelle qu'il faut mesurer. La première pince ampèremétrique injecte une tension, tandis que la deuxième pince mesure le courant qui passe effectivement. L'appareil mesure alors la tension et le courant et calcule la résistance en question. Cette méthode n'est donc utilisable que dans le cas d'un réseau maillé. Lorsque le reste du système de mise à la terre n'est pas directement en parallèle de la prise de terre à mesurer, la mesure est impossible.

Pascal Demuyne
Responsable Produits "SIM"
Lem France

* La méthode de mesure sélective à trois pôles est un brevet Lem.