

# Etablissement des PRISES DE TERRE

# S20

Les prises de terre peuvent être soit des prises de terre spécialement établies, soit des prises de terre de fait, ou toutes combinaisons des unes ou des autres.

La publication UTE 15-120 du 5.7.67 relative à l'établissement des prises de terre pour les bâtiments à usage principal d'habitation ou de bureaux est néanmoins utile à consulter pour les établissements industriels et les locaux recevant du public.

## Résistivité des terrains

Nature du terrain	Résistivité en $\Omega \cdot m$ (*)
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 siliceux.....	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

(\*) Résistivité d'un terrain (ohms.mètre) : c'est numériquement, la résistance en ohms d'un cylindre de terrain de  $1 m^2$  de section et de 1 m de longueur.

■ La résistivité du terrain est une donnée essentielle pour déterminer les caractéristiques d'une prise de terre. La chute de tension le long des filets de courant partant de l'électrode étant surtout concentrée dans son voisinage, on a intérêt à bien connaître la résistivité dans cette zone, dont l'étendue est évidemment d'autant plus grande que la prise de terre est de dimensions elles-mêmes plus grandes. On s'attachera à connaître la résistivité jusqu'à une distance égale à environ deux à trois fois le rayon de l'hémisphère équivalente, au-delà de cette distance des erreurs dans la valeur de la résistivité n'ont qu'une influence relative peu importante sur la valeur réelle de la résistance de la prise.

■ La résistivité est très variable suivant : la granulométrie du terrain, sa porosité, le degré d'imprégnation d'humidité, la conductibilité de l'eau d'imprégnation, la température, variable souvent suivant la profondeur et le niveau de la nappe phréatique. Le **tableau ci-dessus** montre que la résistivité peut, pour une même nature de terrain, varier dans de grandes proportions.

■ Pour permettre une première approximation de la résistance d'une prise de terre, les calculs peuvent être effectués en utilisant les valeurs moyennes indiquées dans le **tableau ci-dessous**.

Nature du terrain	Valeur moyenne de la résistivité en $\Omega \cdot m$
Terrains arables gras, remblais compacts humides.....	50
Terrains arables maigres, graviers, remblais grossiers.....	500
Sols pierreux nus, sable sec, roches imperméables.....	3 000

### Prises de terre spécialement établies

#### Résistance de terre

La résistance d'une prise de terre est proportionnelle à la résistivité du terrain et inversement proportionnelle à sa plus grande dimension linéaire : longueur pour les électrodes verticales et les fils horizontaux, rayon pour l'hémisphère ou la plaque, périmètre pour les conducteurs enterrés en forme de boucle, quadrillage, patte d'oie. Le facteur de proportionnalité tient compte de la forme de la prise de terre et de l'effet de son image.

■ **Prises de terre de forme simple.** (Distances en m, R en  $\Omega$ ,  $\rho$  en  $\Omega.m$ ).

Type de prise de terre	Expression de la résistance	Formule simplifiée généralement suffisante
<b>Electrode hémisphérique</b> (r : rayon)	$R = \rho/2\pi r$	
<b>Electrode verticale ou piquet</b> (d : diamètre, L : longueur)	$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \frac{3L}{d}$	$R = \rho/L$
<b>Conducteur rectiligne horizontal enfoui</b> (d : diamètre, L : longueur, h : profondeur d'enfouissement)	$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \left( \log \frac{3L}{2d} + \log \frac{3L}{8h} \right)$ pour des longueurs ne dépassant pas 500 m	$R = 2 \rho/L$ ou $R = 1,45 \text{ à } 2,4 \rho/L$ suivant que la longueur varie de 10 à 100 m
<b>Boucle circulaire</b> (r : rayon de la boucle, d : diamètre du conducteur, h : profondeur d'enfouissement)	$R = 0,366 \frac{\rho}{2\pi r} \left( \log \frac{16r}{d} + \log \frac{4r}{h} \right)$	$R = 1,6 \text{ à } 2,8 \rho/L$ suivant que L varie de 10 à 100 m
<b>Plaque rectangulaire enfouie verticalement</b> (P : périmètre, h : enfouissement par rapport au centre)	$R = 0,8 \frac{\rho}{P} \left( 1 + \frac{P}{16h + P} \right)$ la longueur de la plaque ne dépasse pas le double en largeur	$R = 1,6 \rho/P$ pour une faible profondeur d'enfouissement $R = 0,8 \rho/P$ pour h supérieure au quart du périmètre
<b>Plaque ou grille posée à plat</b> (r : rayon, a : côté)	Circulaire : $R = \rho/4r$ Carré : $R = \rho/2,26 a$	

Type d'électrode	Hémisphère équivalente
Electrode verticale :	$r = \frac{L}{2\pi}$
Fil horizontal enfoui :	$r = \frac{L}{4\pi}$
Quadrillage, étoile, boucle de périmètre P	$r = \frac{P}{4\pi}$

Du point de vue de l'utilisation du métal dans un sol homogène, les électrodes filiformes sont les plus avantageuses et les électrodes verticales environ deux fois plus avantageuses que les fils horizontaux. Quelle que soit la forme de la prise de terre, à quelque distance, les surfaces équipotentielles sont sensiblement de forme hémisphérique, le

**tableau ci-dessus** donne la valeur approximative du rayon r de l'hémisphère équivalente pour plusieurs types de prises de terre.

#### ■ Prises de terre multiples ou complexes :

— **groupement de prises de terre simples.** La résistance d'électrodes voisines, réunies en parallèle, est plus grande que celle résultant de la simple application de la loi de Kirchoff. La **figure 1** indique la valeur du coefficient de majoration  $k = nR/R_1$ , pour un groupe de n piquets en parallèle, en fonction du rapport D/L entre leur distance et leur longueur (R<sub>1</sub> résistance individuelle et R résistance du groupe de piquets).

En augmentant le nombre d'électrodes, dans un terrain de périmètre donné, on tend à



la limite, vers la résistance de la plaque pleine posée à plat, occupant toute la superficie du terrain.

— prises de terre maillées de grandes dimensions. Résistance en sol homogène (fig. 2) :

$$R = \rho (1/4r + 1/L)$$

$r$  : rayon du cercle de même superficie que le réseau,

$L$  : longueur totale des conducteurs enterrés dans laquelle il faut tenir compte des structures métalliques implantées dans le sol, telles que piliers, membrures de charpentes, canalisations etc.

Pour  $L = 2,33 p$  ( $p$  périmètre du terrain) :  $R = 2 \rho/p$ .

Tension de contact avec des prises de terre.

■ Pour contact avec des piquets d'assez grande longueur (fig. 3), la tension de

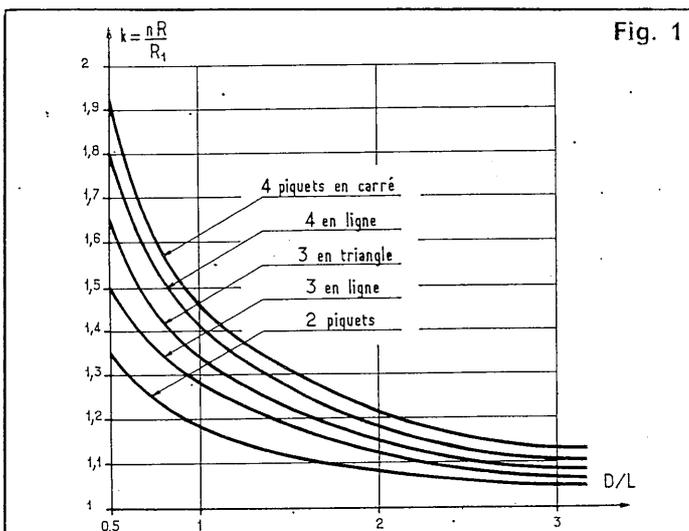


Fig. 1

contact  $U_a$  est, environ :  $U_a = 0,7 \rho i$ , ( $i$  étant le courant écoulé par mètre de longueur du piquet ou courant linéique)  $i = I/L$  ( $I$  étant le courant total écoulé et  $L$  la longueur du piquet).

■ Pour un conducteur horizontal enfoui, la tension de contact avec une structure métallique reliée au conducteur et à 1 m de son aplomb est :  $U_a = 0,8$  à  $0,85 \rho i$  suivant que la profondeur d'enfouissement  $h$  est respectivement de 0,8 m ou 1 m (fig. 4).

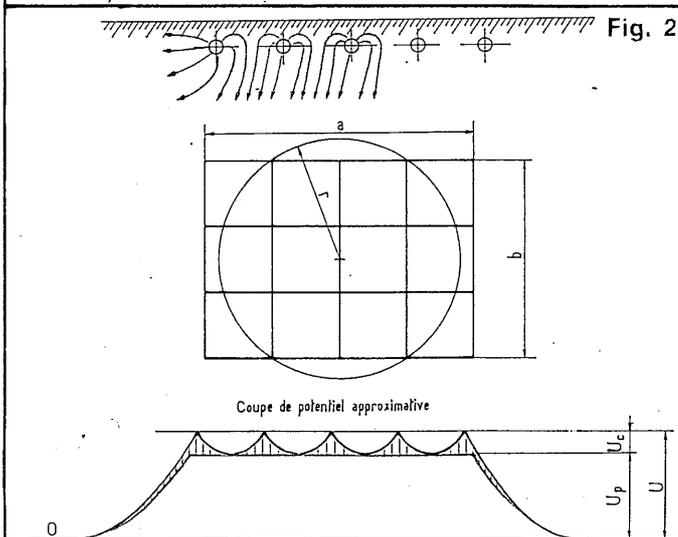


Fig. 2

■ Pour des électrodes filiformes la tension de contact peut donc n'être qu'une assez faible fraction du potentiel  $U$  de la prise de terre, ou tension par rapport au sol loin-

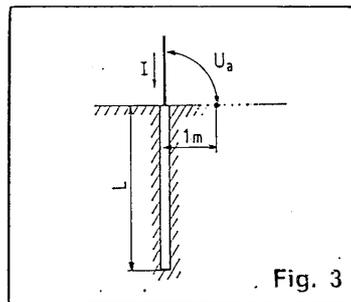


Fig. 3

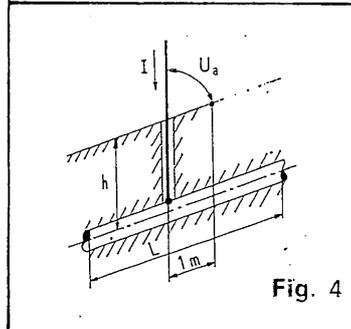
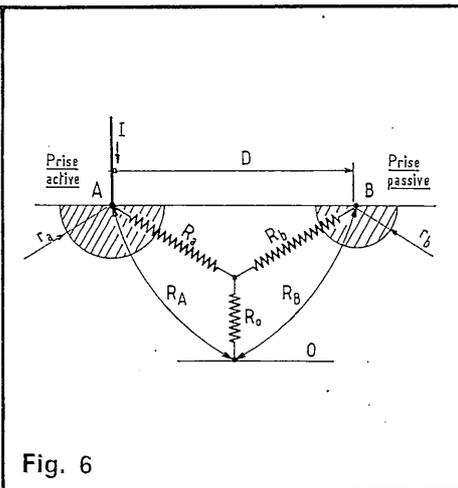
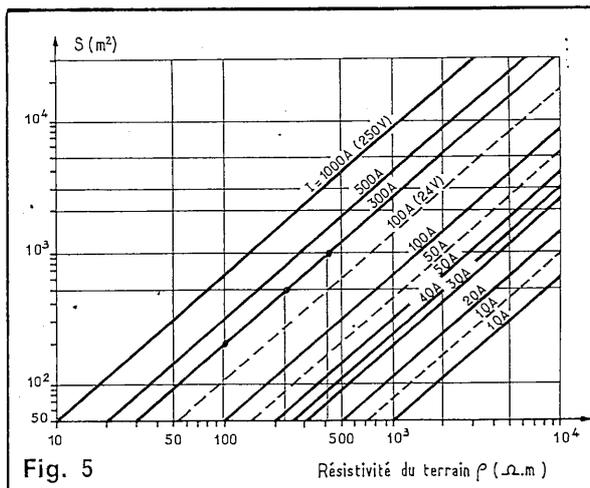


Fig. 4

- $r$  Rayon du cercle de même superficie que le réseau.
- $L$  Longueur totale des conducteurs enterrés dans laquelle il faut tenir compte des structures métalliques implantées dans le sol, telles que piliers, membrures de charpentes, canalisations etc.
- $U_p$  Potentiel de la plaque pleine posée à plat :  $U_p = \rho I/4r$ .
- $U_c$  Chute de tension au voisinage des conducteurs enterrés :  $U_c = \rho I/L$ .
- $U$  Potentiel de la prise de terre ou tension par rapport au sol lointain pour le courant écoulé  $I$  :  $U = RI$ .



tain ( $\dot{U} = RI$ ). Ainsi pour un fil enfoui de 50 m de long, le coefficient de tension  $\alpha = U/U_a$  est égal à 2,5.

■ Dans un réseau maillé, la tension de contact entre une structure métallique reliée à une électrode et à son aplomb, et un point du sol voisin, ne dépend pratiquement que du courant écoulé par cette électrode et n'est guère influencée par des électrodes éloignées.

■ Pour contact à l'accès d'une plateforme équipotentielle (grille noyée dans une forme de béton damée sur le terrain) la figure 5 donne la valeur minimale de la superficie de la plateforme en fonction de la résistivité du terrain pour des courants écoulés à la terre de 10 à 1000 A, dans l'hypothèse où la tension de contact est de 250 V (courant de défaut coupé automatiquement en un temps court) et 24 V (courant de défaut non coupé). Ces indications sont valables pour des surfaces non circulaires, à base plus ou moins carrées; pour des bases rectangulaires beaucoup plus longues que larges, majorer de 10 à 15 % la superficie minimale obtenue sur le graphique.

### Séparation entre deux prises de terre

■ Deux prises de terre quelconques A et B pas très éloignées l'une de l'autre présentent une zone commune de terrain pour l'écoulement du courant. Si l'une, A, est active, c'est-à-dire écoule un courant I, le produit de la résistance  $R_o$  de cette zone commune de terrain par le courant I représente la valeur du potentiel auquel est portée la prise passive B; les deux prises A et B ne sont plus séparées électriquement, ou distinctes, il existe entre elles un certain couplage. Le schéma équivalent est représenté par une étoile à trois branches dont les extrémités A et B figurent les points d'entrée dans le sol des prises A et B, et l'extrémité O le potentiel lointain, zéro, de la terre.

$R_A$  : résistance de la prise de terre A,

$R_B$  : résistance de la prise de terre B,

$R_o$  : partie de résistance commune.

$$R_a = R_A - R_o$$

$$R_b = R_B - R_o$$

■ Prises de terre hémisphériques en sol homogène (rayons respectifs  $r_a$  et  $r_b$ ) (fig. 6)

$$R_o = \rho / 2 \pi D$$

$$R_a = (1/r_a - 1/D) \rho / 2 \pi$$

$$R_b = (1/r_b - 1/D) \rho / 2 \pi$$

Pour un courant I écoulé par la prise A, la prise B passive est portée au potentiel  $R_o I$  :  $U_B = \rho I / 2 \pi D$  alors que le potentiel de la prise A active est  $U_A = \rho I / 2 \pi r_a$

Pour abaisser à 10 % le couplage entre deux prises de terre, leurs centres doivent être distants d'environ 10 fois le rayon de la prise hémisphérique équivalente à la prise active.

■ Lorsque la prise passive est de grande dimension la distance D doit être majorée de la valeur de son rayon, on a :

$$R_o = \frac{\rho}{2 \pi (D - r_b)} \text{ ou } D = \frac{\rho}{2 \pi R_o} + r_b$$

Cette formule est valable lorsque la prise passive est constituée par une plaque circulaire posée à plat,  $r_b$  est alors le rayon de cette plaque.

### Prises de terre de fait

Un grand nombre d'éléments métalliques en contact avec la terre constituent des prises



de terre de fait, dont on doit tenir compte parce qu'elles constituent dans bien des cas, les voies principales de retour des courants de défauts se fermant par la terre.

### Canalisations enterrées

Une canalisation métallique enterrée de très grande longueur se présente vue de l'une de ses extrémités, comme une prise de terre dont l'impédance est indépendante de son étendue, son expression est :  $Z = \sqrt{z R}$  ( $\Omega$ ),  $R$  : résistance de terre linéique de la canalisation en  $\Omega$  km,  $z$  : impédance linéique longitudinale en  $\Omega$  km :

$z = \sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}$ ,  $r$  : résistance longitudinale et  $L \omega$  : réactance longitudinale.

### ■ Canalisations en fer

admettre :

pour  $z$   $\left\{ \begin{array}{l} r = 2/d \text{ (}\Omega \cdot \text{km)} \text{ } d : \text{ diamètre en cm} \\ L \omega = 1 \text{ (}\Omega \cdot \text{km)} \end{array} \right.$

pour  $R = 2 \rho/100$  ( $\Omega \cdot \text{km}$ ),  $\rho$  : résistivité du terrain en  $\Omega \cdot \text{m}$ .

### ■ Plomb des câbles armés

admettre :  $L \omega = 1$  ( $\Omega \cdot \text{km}$ ) et  $r = 2 \rho/100$  ( $\Omega \cdot \text{km}$ ).

La **figure 7** représente la variation de l'impédance de terre  $Z$  des trois câbles armés définis ci-après, en fonction de la résistivité du terrain.

$3 \times 48 \text{ mm}^2$  :  $r = 0,8 \Omega \cdot \text{km}$  ;  $3 \times 95 \text{ mm}^2$  :  $r = 0,6 \Omega \cdot \text{km}$  ;  $3 \times 240 \text{ mm}^2$  :  $r = 0,38 \Omega \cdot \text{km}$ .

Dans les sols bons conducteurs, le plomb d'un câble enterré de grande longueur équivaut à une résistance de terre de l'ordre de  $0,5 \Omega$ , de  $1 \Omega$  si le sol est médiocrement conducteur ou de  $1,5 \Omega$  lorsque le sol est très mauvais conducteur. Ces résultats ne sont valables que si les câbles sont enterrés depuis un certain temps, afin que l'humidité imprègne la gaine extérieure non métallique.

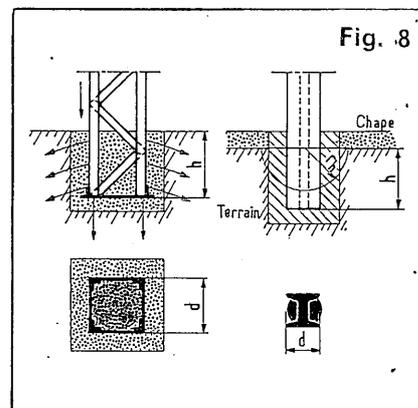
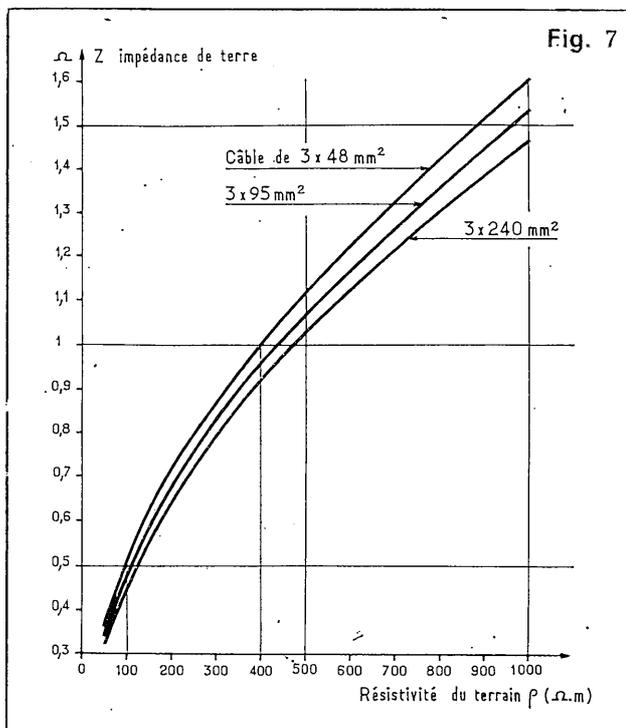
Pour plusieurs câbles en parallèle, ayant des directions différentes, la résistance est  $R = Z/n$  ( $n$  : nombre de câbles).

### Piliers des charpentes métalliques - Armatures des poteaux, pieux et radiers en béton armé.

■ La résistance de terre d'un **pilier en treillis** ou d'un **pieu ou poteau en béton armé** est du même ordre de grandeur que celle du cylindre plein inscrit dans la base, implanté dans le terrain considéré et de même longueur que la profondeur de béton enterré ou que celle du pieu ou du poteau (**figure 8**). (Pour les pieux et poteaux en béton armé, assurer par soudure à l'arc la continuité d'au moins une armature principale). La formule à utiliser est :

$R = 0,366 \rho/L \cdot \log 3L/d$  ( $\Omega$ )  
( $L$  : longueur d'implantation du cylindre en m ;  $d$  : diamètre, en m ;  $\rho$  : résistivité du terrain en  $\Omega \cdot \text{m}$ ).

■ La résistance d'un radier en béton armé, à condition qu'il soit damé sur le sol, est pratiquement la même que celle d'une plaque métallique posée à plat de même superficie.



## S20 Etablissement des PRISES DE TERRE

### Groupe de piliers supportant la charpente d'un bâtiment.

■ **Résistance.** — Pour des piliers régulièrement espacés suivant des distances de 10 à 15 m, la résistance de terre est égale à 1,2 ou 1,3 fois celle d'une ceinture à fond de fouilles entourant le bâtiment (**figure 9**). Pour des écartements plus grands entre les piliers, la résistance est :  $R = k R_1/n$  ( $n$  : nombre de piliers,  $R_1$  : résistance individuelle,  $k$  : coefficient de majoration dont la valeur moyenne est 1,5).

### ■ Tension de contact avec les piliers.

La tension de contact avec un pilier est de l'ordre de :  $U_a = \rho i$ ; ( $i$  : courant linéique écoulé par un pilier).

### Masses en contact avec le sol - Groupe de masses interconnectées.

■ Une masse fixée au sol, constituée par sa surface de contact avec le sol et par les boulons de scellement, une prise de terre de fait.

■ Un groupe de masses fixées au sol et reliées par un conducteur de protection constitue alors une prise de terre multiple, sa résistance qui dépend notamment des dimensions de la base et de l'écartement entre les masses ou machines ainsi que du nombre de masses est souvent très faible.

■ Pour une surface occupée par les machines de plus en plus grande par rapport à la superficie du bâtiment, la résistance tend vers celle de la plaque posée à plat de même superficie

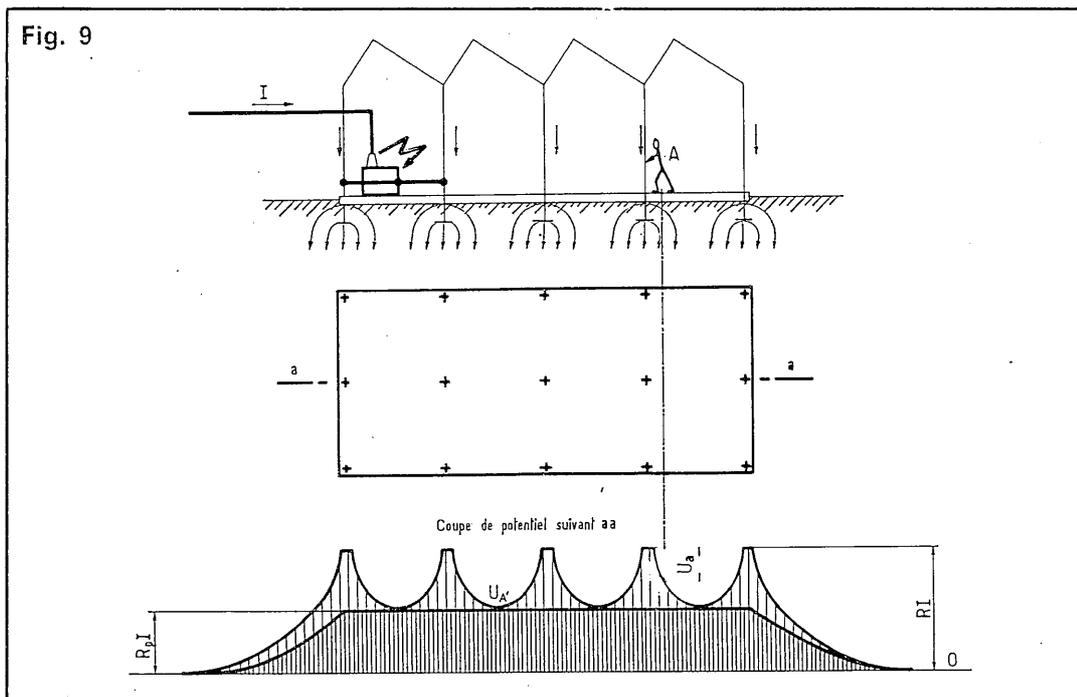
### Interconnexion générale des masses, charpentes et structures métalliques d'un bâtiment (**fig. 10**).

■ La résistance globale de terre d'un tel ensemble n'est guère supérieure à celle d'une plaque posée à plat de même superficie que celle du bâtiment, sous réserve que le béton soit damé sur le terrain (un lit de sable ou de cailloux n'augmente pratiquement pas la résistance).

■ L'interconnexion générale des masses et des structures métalliques réduit au maximum les gradients de potentiel. Pour des écartements de 10 à 15 m entre les piliers, pour un courant de défaut à la terre se fermant vers un point du sol lointain, le coefficient de tension  $\alpha = U/U_a$  varie de 4 à 10 suivant que les machines en contact avec le sol sont de faibles ou de grandes dimensions, et pour des espaces libres entre machines de 1,5 à 2 m. Pour de grands espaces libres, prendre  $\alpha = 2$ .

### Echauffement des prises de terre

L'écoulement d'un courant par une prise de terre a pour effet d'échauffer le terrain qui entoure l'électrode, la conductibilité locale du sol commence par augmenter et la résistance



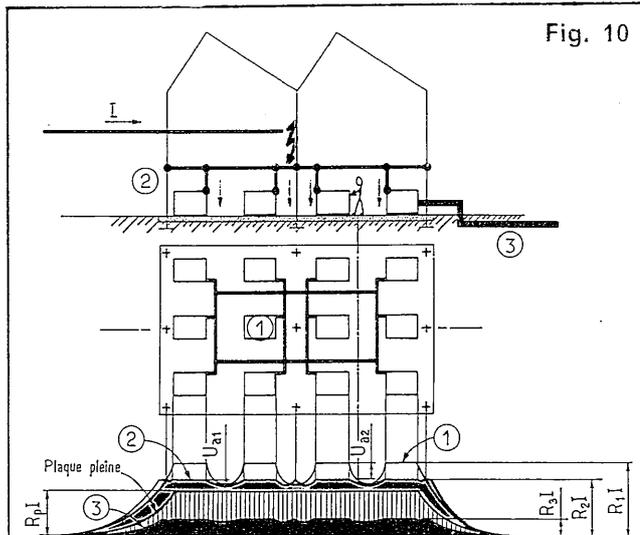


Fig. 10

**Coupes de potentiel**

**Courbe 1 :** Machines interconnectées sans pilier métallique.

**Courbe 2 :** Avec adjonction des piliers métalliques.

**Courbe 3 :** Avec liaison, au système interconnecté, d'une longue canalisation métallique enterrée.

I Courant de défaut à la terre.

$U_a$  Tension de contact.

$U = RI$  : Tension par rapport au sol lointain ( $R_{1l}$ ,  $R_{2l}$ ,  $R_{3l}$ ).

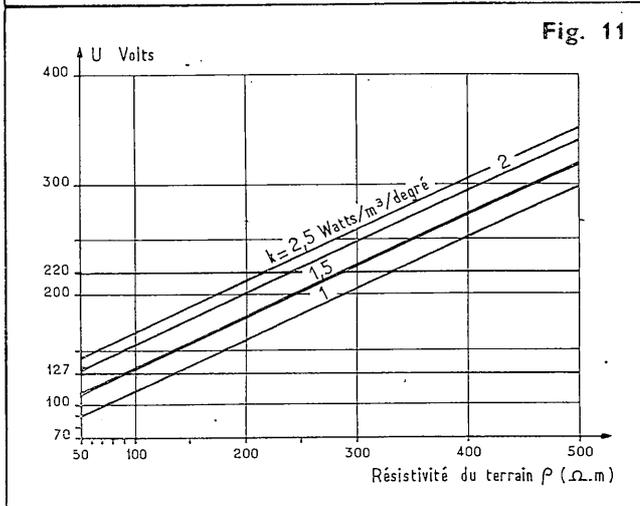


Fig. 11

$\delta \leq \sqrt{C\theta/\rho t}$  (A/m<sup>2</sup>),  $\theta$  : échauffement du terrain en °C;  $C$  : chaleur spécifique du terrain en joules par m<sup>3</sup> et par degré ( $C = 3,4 \times 10^6$ );  $t$  : durée de l'écoulement en secondes. Pour un échauffement limité à 80 °C, en tenant compte du fait que la résistivité du terrain diminue pendant la montée en température on peut employer la formule :

$$\delta \leq 20.000/\sqrt{\rho t} \text{ (A/m}^2\text{)}.$$

Pour des électrodes cylindriques de diamètre  $d$  (m) le courant linéique  $i$  écoulé par mètre de longueur d'électrode ne doit pas dépasser :  $i \leq I/L = 62000/\sqrt{\rho t}$  (A/m)

et de la prise de terre diminue; mais dès que la température atteint 100° au contact de l'électrode, l'eau présente s'évapore, le sol se dessèche, la résistance de terre monte à de très grandes valeurs. Sous la tension appliquée des arcs peuvent se former dans le sol et détruire l'électrode ou le conducteur de terre.

■ **Echauffement en courant permanent.** — L'échauffement  $\theta$  du terrain à la surface de l'électrode de terre est :

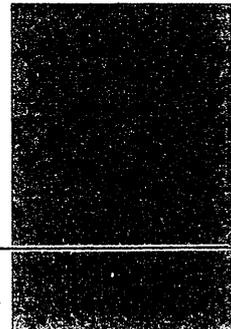
$$\theta = U^2/2 k \rho \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$\rho$  : résistivité du terrain en  $\Omega$ . m.  
 $U$  : tension de la prise de terre par rapport au sol lointain.

$k$  : conductibilité thermique du terrain ( $W/m^3/\text{degré}$ ) = 1 à 1,43 pour calcaires et argiles, 1,4 à 2 pour les sables et 2 à 2,5 pour les terrains très humides).

La figure 11 donne la valeur maximale de la tension de la prise de terre  $U$  en fonction de la résistivité du terrain pour diverses valeurs de  $k$  et un échauffement de 80 °C, on voit qu'il existe une différence très marquée, du point de vue de l'échauffement des prises de terre, entre les installations à 127 V et 220 V de tension simple.

■ **Echauffement dû à un écoulement temporaire du courant.** — Lorsque le courant écoulé par la prise de terre est interrompu automatiquement, le problème est de déterminer la densité de courant  $\delta$  admissible à la surface de l'électrode pour la durée  $t$  de passage du courant dans le terrain de résistivité  $\rho$  donnée.



**EXTRAIT DE LA BROCHURE INRS N° ED 537 (Edition 1991)**  
**Termes principaux de l'électrotechnique traditionnelle relatifs à la sécurité**

Dans le cas où l'installation secondaire est une installation BT selon schéma IT, on réunit à la terre un point de l'installation secondaire par l'intermédiaire d'un limiteur de surtension qui « amorce » et transforme en défaut de l'installation primaire un défaut affectant les enroulements primaire et secondaire. Le domaine de tension de l'installation primaire doit être supérieur à celui de l'installation secondaire pour qu'il y ait « amorçage » du limiteur de surtension.

**1.7.3. Prises de terre électriquement distinctes**

« Prises de terre suffisamment éloignées les unes des autres pour que le courant maximal susceptible d'être écoulé par l'une d'elles ne modifie pas sensiblement le potentiel des autres »

Généralement c'est le cas lorsque les différentes prises de terre sont éloignées les unes des autres d'au moins 10 ou 15 mètres, dans un terrain de résistivité moyenne, et à condition qu'aucun élément conducteur enterré (canalisation de fluide, armature de câble électrique, etc.) ne propage un potentiel de l'une vers l'autre.

Pratiquement il est très difficile, en milieu urbain, ou en zone industrielle, de trouver des prises de terre électriquement distinctes.

A titre d'exemple, citons les établissements importants (centre de recherches, construction aérospatiale, construction électronique, etc.) constituant de vastes ensembles interconnectés, maillés, et à l'intérieur desquels on crée des prises de terre dites « électronique » ou « mesure » dans la très très grosse majorité des cas, **celles-ci ne sont pas électriquement distinctes.**

**1.7.4. Conducteur de protection**

« Conducteur prescrit dans certaines mesures de protection contre les chocs électriques et destiné à relier électriquement certaines des parties suivantes :

- masses ;
- éléments conducteurs ;
- borne principale de terre ;
- prise de terre ;
- point de mise à la terre de la source d'alimentation ou point neutre artificiel »

**1.7.5.1. Conducteur principal de protection**

« Conducteur de protection auquel sont reliés les conducteurs de protection des masses, le conducteur de terre et éventuellement les conducteurs de liaisons équipotentielles ».

**1.7.6.1. Conducteur de terre**

« Conducteur de protection reliant la borne principale de terre à la prise de terre »