

215

320. — LE COMPORTEMENT DES PRISES DE TERRE SOUS COURANTS DE CHOC DE GRANDE INTENSITÉ

par **K. BERGER**,

Docteur ès Sciences techniques, chef des essais de la Commission de l'Association suisse des Électriciens et de l'Union des Centrales suisses d'Électricité pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), Zürich (Suisse).

RÉSUMÉ.

Sur la question de savoir si la résistance d'une prise de terre mesurée à l'aide des appareils ordinaires, est également valable en cas de choc, les opinions sont encore très divergentes. D'autre part, il était intéressant d'examiner si cette valeur ohmique est encore valable en cas de courants de choc de très grande intensité, tels qu'ils peuvent se présenter lors de coups de foudre. D'importants essais ont été entrepris dans ce but à la Station d'essais de Gösgen de la Commission de l'A. S. E. et de l'U. C. S. pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), afin de se rendre compte de quelle façon se comportent, en principe, les différentes prises de terre soumises à des chocs.

Le présent rapport résume quelques résultats de ces mesures. L'eau plus ou moins pure présente toujours la même résistance, qu'il s'agisse d'un choc ou d'une tension alternative à basse fréquence, tandis que, pour tous les genres de terrain examinés (argile, humus, gravier, sable), cette résistance diminue en partie très fortement dès qu'il s'agit d'intensités de champ suffisamment élevées, dépassant 2,5 à 3 kV : cm. Lors du passage d'un courant de choc, les caractéristiques courant-tension sont alors analogues à celles des résistances de parafoudres dépendantes de la tension. Pour le sable sec, les densités de courant nécessaires sont les plus faibles, car la résistivité est très élevée; au cours de l'essai, il s'y produit même des tunnels de perforation analogues aux « fulgurites » des éclairs. Quelques autres constatations d'ordre physique intéressantes ont également été faites.

RAPPORT

MESURE D'EAU DE SOURCE
 ET DE DIFFÉRENTS GENRES DE TERRAIN
 DANS LE MODÈLE HÉMISPHERIQUE DE GÖSGEN.

Pour ces essais, un bassin hémisphérique de 2,5 m de diamètre fut construit en briques d'argile brunes, garni intérieurement d'un treillis métallique destiné à servir d'électrode et recouvert d'une mince couche d'argile pour le rendre étanche. La terre à examiner était versée dans ce bassin et une boule métallique chromée de 250 à 500 mm de diamètre y était à moitié plongée. Cette sphère était reliée, comme l'indique le schéma de la figure 1, au générateur

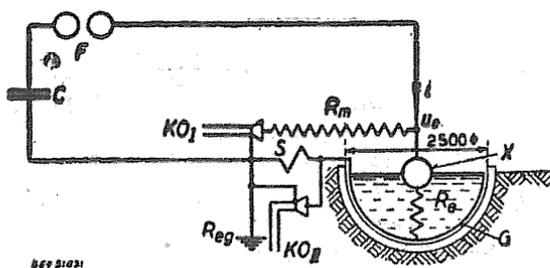


Fig. 1. — Schéma des mesures de choc au modèle hémisphérique de Gösgen.

C , capacité du générateur de chocs; F , éclateur du générateur de chocs; R_e , résistance de terre à essayer; R_{eg} , résistance de terre du générateur de chocs; X , électrode de terre intérieure; G , treillis servant d'électrode extérieure; R_m , résistance pour la mesure de u_e à l'oscillographe cathodique I, S , shunt pour la mesure de i à l'oscillographe cathodique II; KO_I et KO_{II} ; oscillographes cathodiques I et II.

de chocs, tandis que le treillis métallique l'était au pôle mis à la terre de ce générateur, par l'intermédiaire du shunt servant à la mesure du courant. La résistance du bassin par rapport au sol environnant était suffisante pour permettre de mesurer le courant selon le schéma de la figure 1 avec la précision nécessaire.

Les deux oscillographes cathodiques I et II mesurent la tension du modèle hémisphérique et le courant qui s'y écoule. La tension

maximum du générateur de choc atteint environ 200 kV en un seul étage (capacité de 1 μ F environ) et de 800 kV en quatre étages (1/16 μ F). Le circuit présente une inductance de 100 μ H environ. Ces valeurs déterminent la raideur maximum que l'intensité de choc peut atteindre dans la prise de terre à examiner.

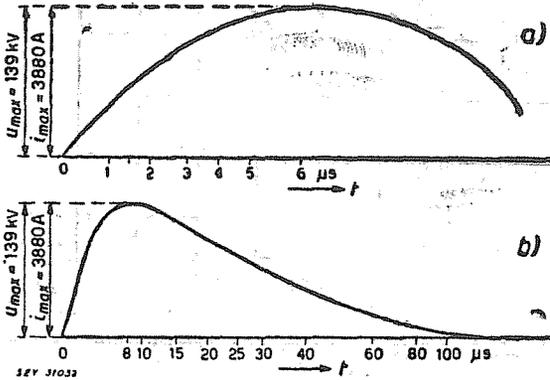


Fig. 2. — Exemple d'un oscillogramme dessiné à deux échelles pour la tension u et le courant i au modèle hémisphérique rempli d'eau.

Résistance $R_e = u_e : i =$ constante.

Les résultats de quelques mesures sont reproduits sur les figures 2 à 15.

La figure 2 représente un oscillogramme du courant et de la tension pour le bassin rempli d'eau, dont la résistivité atteignait en moyenne 3 000 Ω : cm. Le courant i et la tension u ont la même allure, le quotient $\frac{u}{i}$ étant constant. C'est ce que montre la figure 3, où la tension u au bassin est représentée en fonction de la densité du courant ou de l'intensité de champ autour de l'électrode sphérique de 250 mm. Tous les points relevés (qu'ils correspondent au front ou à la queue du choc) se trouvent sur la même droite, qui correspond à une résistance de 35,5 Ω si l'on tient compte que la surface hémisphérique est de 980 cm². Avec un appareil de mesure ordinaire à basse fréquence on obtient 36,0 Ω , c'est-à-dire la même valeur, erreur de mesure comprise.

L'eau se comporte donc tout à fait normalement jusqu'aux tensions les plus élevées possibles (à partir de 150 kV, il se produit des claquages à la surface de l'eau). Sa résistance au choc correspond à la valeur déterminée en basse fréquence avec les méthodes habituelles.

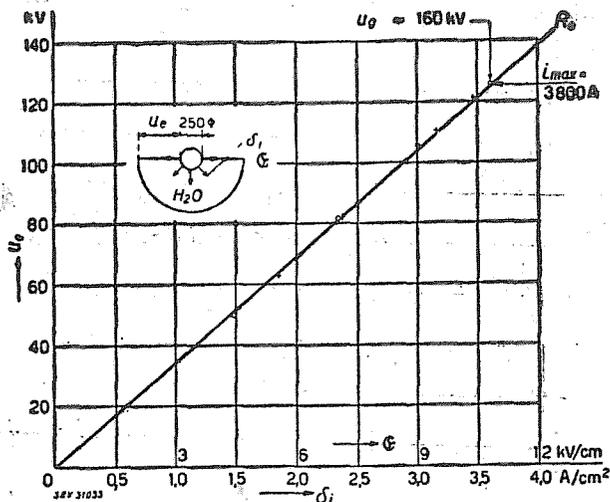


Fig. 3. — Courbe de la tension u_e au modèle hémisphérique rempli d'eau en fonction de la densité de courant δ_i à l'électrode intérieure (sphère de 250 mm de diamètre) et de l'intensité de champ E .

ρ , résistance spécifique de l'eau ($\approx 3000 \Omega \cdot \text{cm}$);

F , surface de l'hémisphère (980 cm^2).

Courant $i = F\delta_i = 980\delta_i$.

$R_c = u_e : i = 36,0 \Omega$ en cas de choc; $R_c \approx 35,5 \Omega$ sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur, jusqu'à 160 kV; O, points de mesure dans le front du choc, selon figure 2; +, points de mesure dans la queue du choc, selon figure 2.

Les figures suivantes illustrent le comportement des différents genres de terrain, à savoir :

Les figures 4 et 5 un mélange d'humus, de sable et de gravier, tel qu'il se rencontre couramment à Gösgen, mesuré avec une sphère de 500 mm de diamètre;

Les figures 6 et 7 de l'argile, mesurée avec une sphère de 500 mm de diamètre;

Les figures 9 et 10 du sable humide de l'Aar, mesuré avec une sphère de 500 mm de diamètre;

Les figures 11 et 12 de l'humus humide, mesuré avec une sphère de 500 mm de diamètre.

Pour chaque genre de terrain, la densité de courant calculée à l'électrode sphérique de 250 ou 500 mm de diamètre figure en abscisse (δ_i) et la tension à cette électrode (u_e) en ordonnée. Les

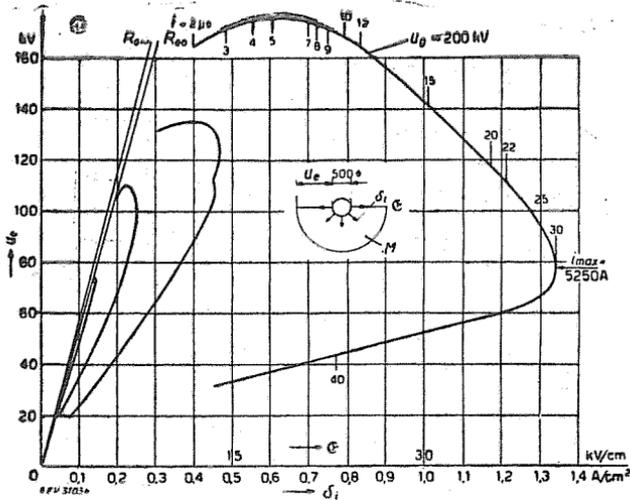


Fig. 4. — Courbes de la tension u_e au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant δ_i et de l'intensité de champ φ à l'électrode intérieure (sphère de 500 mm de diamètre).

Électrolyte, mélange de gravier, sable et humus (M) :

$$\rho \approx 30\,000 \Omega : \text{cm},$$

$$F = 3\,930 \text{ cm}^2, \text{ surface de l'hémisphère.}$$

$R_{00} \approx 141 \Omega$, valeur limite de la résistance à de faibles chocs; $R_{50} \approx 148 \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur.

Quelques temps sont notés sur la courbe extérieure.

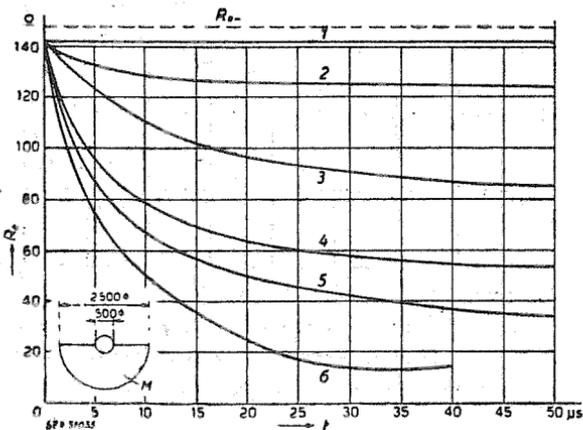


Fig. 5. — Courbes de la résistance de terre R_e , en fonction du temps t

pour des chocs de courant de différentes intensités.

Électrolyte, mélange de gravier, sable et humus (M) :

$$\rho \approx 30\,000 \Omega : \text{cm}.$$

Disposition d'essais comme sur la figure 4.

1, $i_{\max} = 250 \text{ A},$

3, $i_{\max} = 975 \text{ A},$

5, $i_{\max} = 2\,400 \text{ A},$

2, $i_{\max} = 560 \text{ A},$

4, $i_{\max} = 1\,800 \text{ A},$

6, $i_{\max} = 5\,300 \text{ A},$

$$R_{50} = 148 \Omega, \text{ résistance à } 50 \text{ Hz.}$$

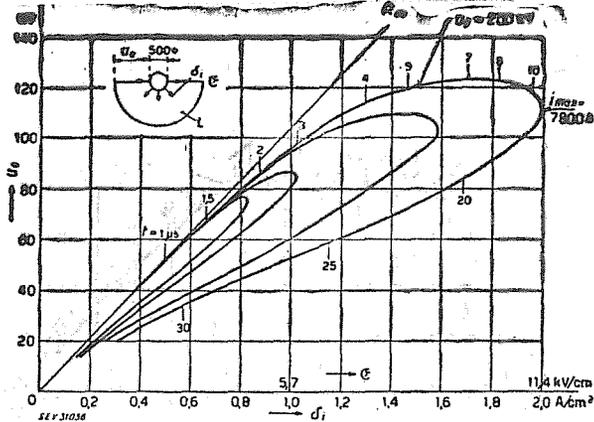


Fig. 6. — Courbes de la tension u_e au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant σ_i , et de l'intensité de champ \mathcal{E} à l'électrode intérieure (sphère de 500 mm de diamètre).

Electrolyte, argile humide, $\rho \approx 5\,700\ \Omega : \text{cm}$ (L).

F , 3 930 cm^2 , surface de l'hémisphère; $R_{\text{oh}} \approx 26,6\ \Omega$, valeur limite de la résistance à de faibles chocs; $R_{\text{ac}} \approx 27,8\ \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur

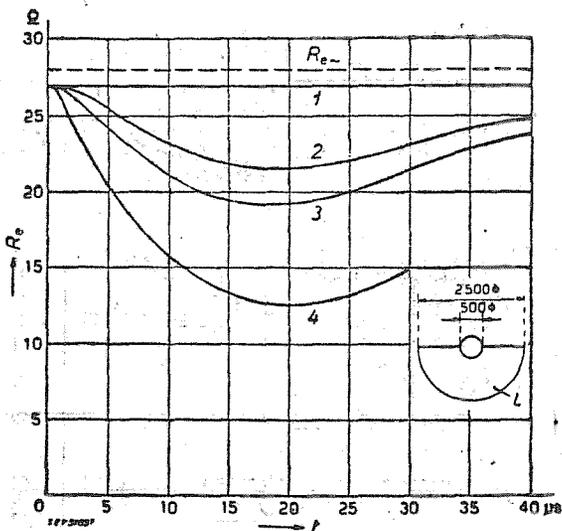


Fig. 7. — Courbes de la résistance de terre R_e en fonction du temps t pour des chocs de courant de différentes intensités.

Electrolyte, argile humide, $\rho \approx 5\,700\ \Omega : \text{cm}$ (L).

Disposition d'essais comme sur la figure 6.

- | | |
|--|--|
| 1, $i_{\text{max}} = 880\ \text{A}$, | 3, $i_{\text{max}} = 4\,050\ \text{A}$, |
| 2, $i_{\text{max}} = 3\,300\ \text{A}$, | 4, $i_{\text{max}} = 7\,800\ \text{A}$. |

$R_{\text{ac}} \approx 27,8\ \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz.

courbes obtenues n'étant valables que pour une certaine forme de courant $i(t)$, elles sont cotées en outre avec le paramètre des temps, ce qui permet d'y lire le quotient $\left(\frac{di}{dt}\right)$. A titre d'exemple,

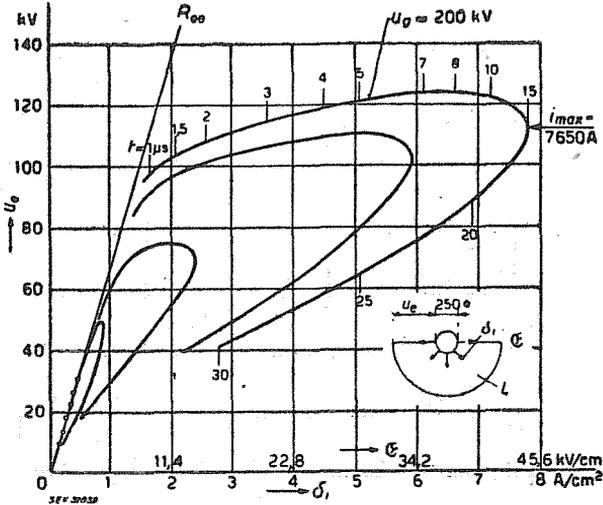


Fig. 8. — Courbes de la tension u_0 , au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant δ_i , et de l'intensité de champ \mathcal{E} à l'électrode intérieure (sphère de 250 mm de diamètre).

Électrolyte, argile humide $\rho \simeq 5\,700 \Omega \cdot \text{cm}$ (L); $F = 980 \text{ cm}^2$, surface de l'hémisphère; $R_{00} \simeq 68 \Omega$, valeur limite de la résistance à de faibles chocs; $R_{ac} \simeq 78 \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur.

la figure 13 reproduit à nouveau l'allure du courant et de la tension en fonction du temps, telle qu'elle a servi à la construction des figures 11 et 12, pour un faible courant de 500 A et pour un courant de forte intensité de 5 000 A. En outre, chaque courbe cotée porte également l'indication de la tension de charge du générateur de chocs et l'intensité maximum du courant de la plus large des courbes. Pour chaque point des courbes, la valeur mesurée du courant peut être aisément calculée par multiplication avec la surface de l'électrode sphérique indiquée sur les figures.

Les figures 4 à 12 montrent clairement que le rapport $\frac{u}{i}$ n'est plus constant à la prise de terre, mais dépend de l'allure du courant. Plus exactement, il ne s'agit pas seulement de la valeur momentanée du courant, mais bien de l'ensemble de la variation de celui-ci.

Les valeurs de la résistance ne sont plus précises. On a affaire à des courbes d'hystérésis analogues à celles qui se rapportent aux résistances variables des parafoudres, mais la tension maximum

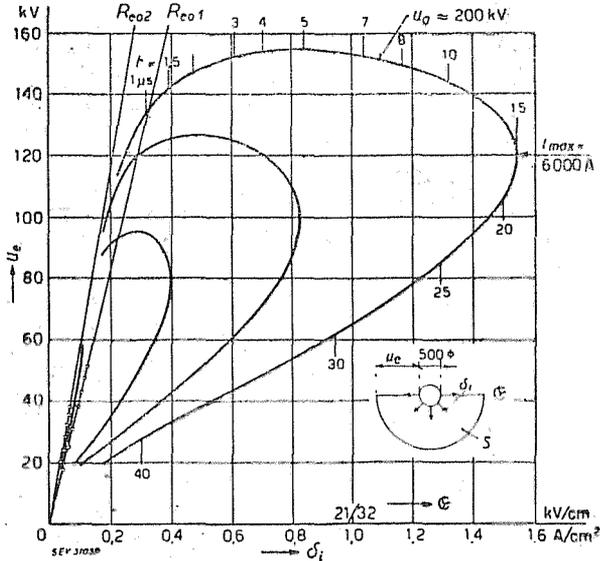


Fig. 9. — Courbes de la tension u_e au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant δ_i , et de l'intensité de champ \mathcal{E} à l'électrode intérieure (sphère de 500 mm de diamètre).

Électrolyte, sable humide, $F = 3\,930\text{ cm}^2$ (S).

Immédiatement après remplissage :

$$\begin{aligned} \rho &= 21\,000\ \Omega \cdot \text{cm}, \\ R_{c0} &\simeq 108\ \Omega, \\ R_{c-1} &\simeq 105\ \Omega, \end{aligned}$$

12 h après remplissage :

$$\begin{aligned} \rho &= 32\,000\ \Omega \cdot \text{cm}, \\ R_{c01} &\simeq 150\ \Omega, \\ R_{c-2} &\simeq 162\ \Omega. \end{aligned}$$

atteinte à la prise de terre (tension résiduelle) demeure sensiblement dépendante du courant. C'est ce que montre la figure 12. A titre de comparaison avec toutes les autres courbes, le générateur de chocs a été exceptionnellement branché en série et fournissait 650 kV et des courants oscillants de 7 200 et 11 400 A. La tension résiduelle atteinte après 2,5 μs environ est respectivement de 45 à 60 % plus élevée que sous un courant de 5 400 A croissant plus lentement (maximum de tension atteint après 5 μs environ).

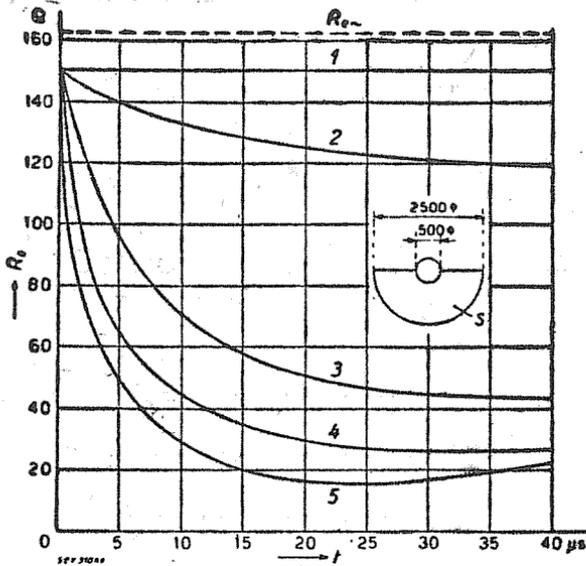


Fig. 10. — Courbes de la résistance de terre R_e en fonction du temps t pour des chocs de courant de différentes intensités.

Électrolyte : sable humide, $\rho \approx 32\ 000\ \Omega : \text{cm}$ (S).

Disposition d'essais comme sur la figure 9.

- 1, $i_{\max} = 250\ \text{A}$, 3, $i_{\max} = 1\ 500\ \text{A}$, 5, $i_{\max} = 6\ 000\ \text{A}$,
 2, $i_{\max} = 420\ \text{A}$, 4, $i_{\max} = 3\ 250\ \text{A}$,

$R_{e0} \approx 162\ \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz.

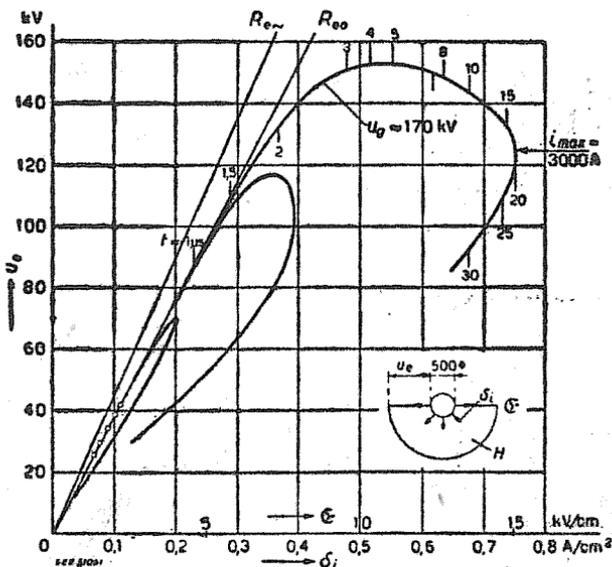


Fig. 11. — Courbes de la tension u_e au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant δ_i , et de l'intensité de champ ϵ à l'électrode intérieure (sphère de 500 mm de diamètre).

Électrolyte : humus humide, $\rho \approx 20\ 000\ \Omega : \text{cm}$ (H).

$F = 3\ 930\ \text{cm}^2$, surface de l'hémisphère; $R_{e0} \approx 100\ \Omega$, valeur limite de la résistance à de faibles chocs; $R_{e\infty} \approx 117\ \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur, jusqu'à 170 kV.

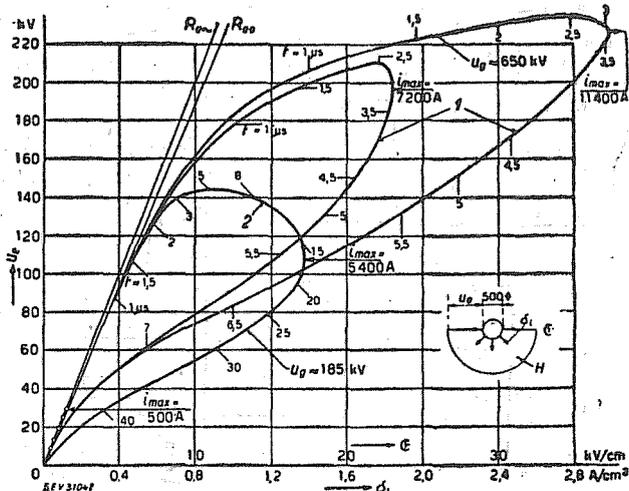


Fig. 12. — Courbes de la tension u_e au modèle hémisphérique, en fonction de la densité de courant δ_1 et de l'intensité de champ ϵ à l'électrode intérieure (sphère de 500 mm de diamètre).

Électrolyte : humus humide, $\rho \approx 12\ 500\ \Omega : \text{cm}$ (H).

$F = 3\ 930\ \text{cm}^2$, surface de l'hémisphère; $R_{e0} \approx 61\ \Omega$, valeur limite de la résistance à de faibles chocs; $R_{e\infty} \approx 64\ \Omega$, résistance sous courant alternatif 50 Hz; u_g , tension du générateur, jusqu'à 650 kV.

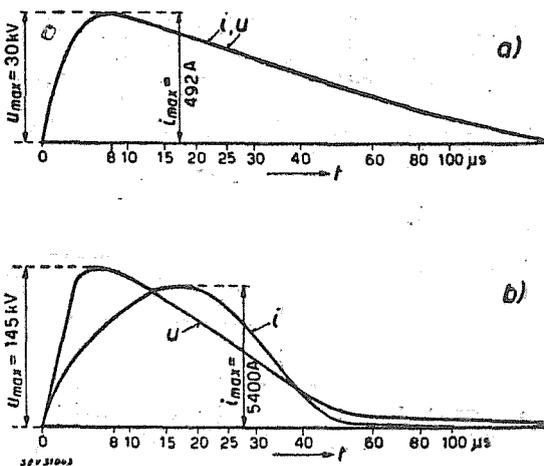


Fig. 13. — Exemples d'oscillogrammes pour le comportement de l'humus humide ($\rho \approx 12\ 500\ \Omega : \text{cm}$) sous faible choc (courbe a) et sous choc de courant de grande intensité (courbe b).

Disposition d'essais comme sur la figure 12.

La boucle d'hystérésis est d'autant plus large que le courant de choc est plus grand et qu'il dure plus longtemps.

Un courant de choc suffisamment faible ne donne pas lieu à une boucle (première courbe de la figure 13). La valeur de résistance $\frac{u}{i}$ devient alors précise. En outre, cette limite de faible courant de choc est identique à la valeur de résistance de la prise de terre ($R_{e0} \approx R_{e-}$) mesurée en basse fréquence de la manière habituelle. Le Tableau I indique les résultats des mesures effectuées avec le modèle hémisphérique. La signification des différentes rubriques est expliquée dans la légende du Tableau I.

Il n'est pas difficile de lire n'importe quelle valeur de résistance sur les courbes, par exemple après 2 ou 5 μ s; on peut donc renoncer à le faire ici. Par contre, il est nécessaire de répondre à la question de savoir à quelles densités de courant la résistance u devient variable ou jusqu'à quelles valeurs on peut parler d'une résistance déterminée. Dans ce but, les valeurs limites de la densité de courant ∂_i calculées d'après les observations faites sont groupées dans le Tableau II, qui indique également les intensités de champ correspondantes $\mathcal{E} = \rho \cdot \partial_i$ à la sphère intérieure.

Il résulte de ce qui précède que c'est surtout l'intensité de champ à la petite électrode qui importe : Tant que cette intensité est inférieure à 2,5 ou 3,0 kV : cm, la résistance de choc est bien définie et correspond à la résistance de prise de terre mesurée de la manière habituelle. Par contre, lorsque l'intensité de champ est plus élevée, il se

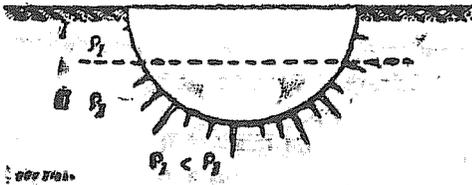


Fig. 14. — Formation de « fulgurites » dans du sable sec entourant l'hémisphère, principalement dans la couche mauvaise conductrice.

produit des boucles d'hystérésis pour tous les genres de terrain (mais non pour l'eau). La résistance présente alors des valeurs qui sont toujours plus faibles que lors de la mesure habituelle sous courant alternatif.

Dans le sable sec des rives de l'Aar, on peut nettement constater

TABLEAU I. — Résistances des différents genres de terre et d'eau de source dans le modèle hémisphérique de 2,5 m de diamètre.

Essai n°.....	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Genre de terre...	Eau	Terre de Gösgen	Argile humide	Sable humide	Humus humide	Humus humide
Électrode intérieure.....	Sphère 250 Ø	Sphère 500 Ø	Sphère 500 Ø	Sphère 500 Ø	Sphère 500 Ø	Sphère 500 Ø
F (cm ²).....	980	3930	3930	3930	3930	3930
$u_{g\max}$ (kV).....	env. 160	env. 200	env. 200	env. 200	env. 185	env. 650
$u_{e\max}$ (kV).....	125	175	123	155	145	235
$i_{e\max}$ (A).....	3800	5250	7800	6000	5400	11 400
T_{hi} (µs).....	30	40:50	22:24	30:32	30:32	5:6
$\delta_{i\max}$ (A : cm ²)....	3,8	1,35	2	1,55	1,38	2,9
ρ_m (kΩ : cm).....	3	30	5,7	30	12,5	12,5
$\mathcal{E}_{i\max}$ (kV : cm)...	11,5	40	11,5	50	17,2	36
R_{e-}	36	148	27,8	env. 150	64	64
R_{e0}	35,5	141	26,6	150	61	61
R_{e1}	35,5	70	18,4	48	41	22
R_{e2}	35,5	14,5	14,4	20	20	20
R_{e3}	35,5	12,8	12,7	16,5	16,5	17,5
$\frac{R_{e0}}{R_{e3}}$	1	11,5	2,2	9	3,9	3,7
Figures nos.....	2 et 3	4 et 5	6 et 7	9 et 10	11 et 12	12

F , surface de contact à la sphère de 250 ou 500 mm (cm²);

u_g , tension du générateur de chocs (kV);

u_e , tension à la prise de terre (kV);

i_e , courant dans la prise de terre (A);

T_{hi} , durée de mi-amplitude du courant de choc (s);

δ_i , densité de courant à la sphère, calculée (A : cm²);

ρ , résistivité de la terre (k : cm);

\mathcal{E}_i , intensité de champ théorique à la sphère, calculée d'après $\rho \cdot \delta_i$ (kV : cm);

R_{e-} , résistance de terre à basse fréquence (mesurée avec Terrafix);

R_{e0} , résistance de terre sous choc, valeur limite sous faible intensité;

$R_{e1} - R_{e2} - R_{e3}$, résistance de terre sous choc, à u_{\max} , i_{\max} et à résistance minimum.

TABLEAU II.

Essai n°	Genre de terrain.	Valeurs limites de		ρ (k Ω : cm)
		δ_i (A : cm ²).	$\bar{w}_i = \rho\delta_i$ (kV : cm)	
1.	Eau	4	12	3
2.	Terre de surface à Gösgen..	0,08	2,4	30
3.	Argile.....	0,5	2,8	5,7
4.	Sable humide.....	0,08	2,6	32
5.	Humus humide.....	0,15	3,0	20
6.	Humus humide.....	env. 0,18	env. 2,8	15

des trous de perforation lorsque l'électrode hémisphérique est sortie avec précaution du sable après un essai de choc avec un courant d'intensité élevée. Comme le montre la figure 4, des trous partant de l'hémisphère s'enfoncent dans le sable. *Si le courant était maintenu pendant longtemps, il se produirait probablement des « fulgurites ».* La résistivité du sable sec est très mal définie; elle était de l'ordre de 500 k Ω : cm. La figure 15 montre à titre d'exemple un oscillogramme de la perforation du sable sec.

La diminution de la résistance de terre lorsque les intensités de champ dépassent 3 kV : cm provient probablement de décharges dans les pores du terrain ou du genre de conduction du courant aux petites surfaces de contact des particules de terre qui se touchent. En effet, lorsque l'intensité de champ est trois fois plus élevée (7 à 10 kV : cm), il se produit déjà une perforation de ces couches de terre.

**II. — MESURE DE DIFFÉRENTES ÉLECTRODES
DE TERRE
DANS LE TERRAIN DE GÖSGEN.**

Les électrodes utilisées pour ces-essais furent les suivantes :

- a. Plaques de cuivre et de fer, 500 × 960 × 1,5 mm;
- b. Fil de cuivre et de fer, longueur 18 m, diamètre 6 mm;
- c. Sphère de cuivre, diamètre 250 mm;
- d. Tubes de cuivre et de fer, diamètre extérieur 35 et 33,5 mm, longueur jusqu'à 5 m.

Les électrodes de fer étaient galvanisées à chaud.
Les plaques et les fils furent enterrés horizontalement, tandis

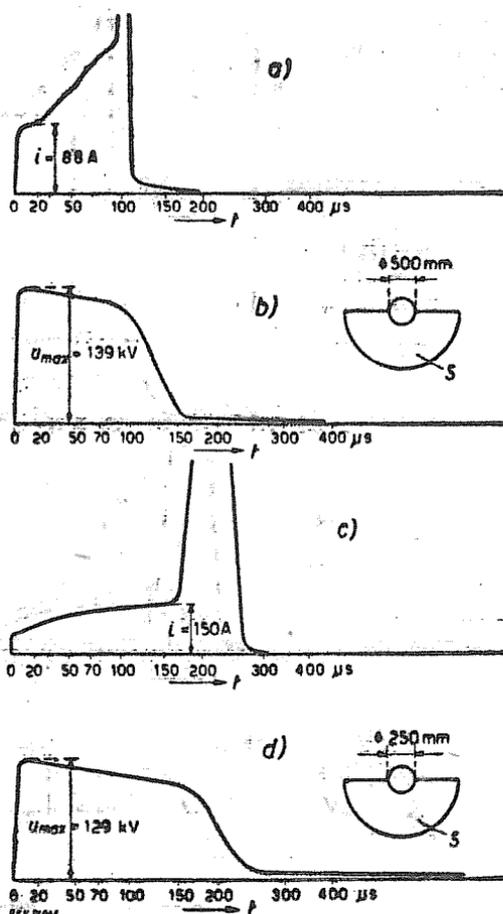


Fig. 15. — Exemples d'oscillogrammes pour le comportement du sable sec sous choc ($\rho \approx 500 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^3$).

- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| a. Variation du courant | } Sphère de 500 mm de diamètre; |
| b. Variation de la tension | |
| c. Variation du courant | } Sphère de 150 mm de diamètre. |
| d. Variation de la tension | |

que les tubes étaient enfoncés verticalement dans le sol. A Gösgen le sol se compose essentiellement de gravier et de sable recouverts d'une mince couche d'humus. Près de la station d'essais, cette

couche de terrain a une épaisseur de 4 à 5 m; il s'agit d'un dépôt de matériaux provenant de l'excavation du canal de fuite de l'usine. Au-dessous de cette couche se trouve la couche d'humus (moraine) de la plaine de l'Aar. Des mesures en basse fréquence ont indiqué une résistivité du sol de 100 k Ω :cm environ.

Comme le montre la figure 16, la méthode de mesure consiste à décharger le générateur de chocs sur la prise de terre à essayer,

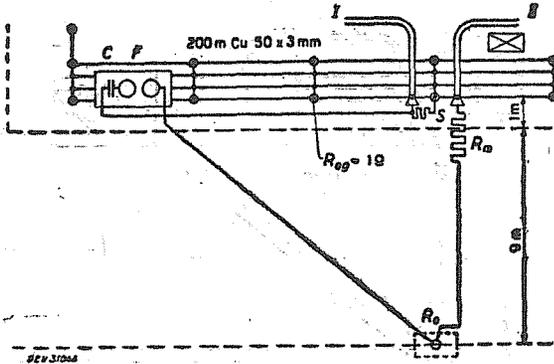


Fig. 16. — Disposition d'essais de choc sur la prise de terre R_n dans le terrain de Gösgen avec $\rho \approx 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$.

C, F , capacité et éclateur du générateur de chocs; R_n , prise de terre essayée; $R_{0g} \approx 1 \Omega$, résistance de la prise de terre du générateur de chocs; R_m , résistance pour la mesure de la tension à l'oscillographe cathodique II; S , shunt pour la mesure du courant à l'oscillographe cathodique I.

qui se trouve à environ 9 m de la grande prise de terre du générateur. Le courant s'écoule par les deux prises de terre en série. On mesure le courant à l'aide d'un shunt dans la ligne de terre du générateur de chocs et la tension entre la prise de terre à essayer et la prise de terre du générateur. Cette tension est donc la somme des tensions à la prise de terre à essayer et à la prise de terre du générateur. Cette dernière présente une résistance de 1 à 1,5 Ω , de sorte qu'elle peut généralement être négligée par rapport à celle de la prise de terre à essayer.

Les résultats des nombreuses mesures qui ont été faites sont reproduits en partie sur les figures 17 à 22, à savoir :

Figure 17, pour une plaque enfouie horizontalement à 20, 40, 80 et 120 cm de profondeur.

Figure 18, pour un fil enfoui à 20, 40 et 80 cm de profondeur.

Figure 19 et 20, pour une sphère enfouie à moitié dans la terre.

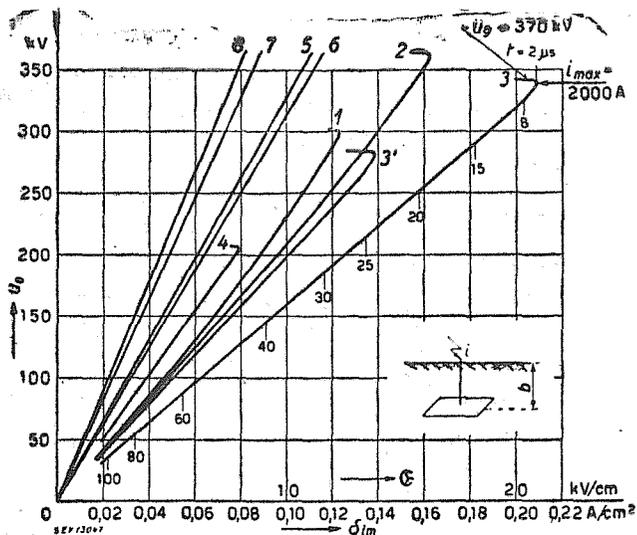


Fig. 17. — Courbes de la tension u_g à la prise de terre dans le terrain de Gösgen ($\rho \approx 100 \text{ k}\Omega : \text{cm}$) en fonction de la densité moyenne de courant δ_{im} ou de l'intensité moyenne de champ \mathcal{E} à l'électrode.

Électrode : plaque de $960 \times 500 \times 1,5 \text{ mm}$, $F = 9\,600 \text{ cm}^2$;
 u_g , tension du générateur, jusqu'à 370 kV.

Comportement sous choc :		Comportement sous 50 Hz :	
1,	profondeur $b = 20 \text{ cm}$;	5,	analogue à 1;
2,	" $b = 40 \text{ cm}$;	6,	" 2;
3, 3',	" $b = 80 \text{ cm}$;	7,	" 3, 3' ;
4,	" $b = 120 \text{ cm}$;	8,	" 4.

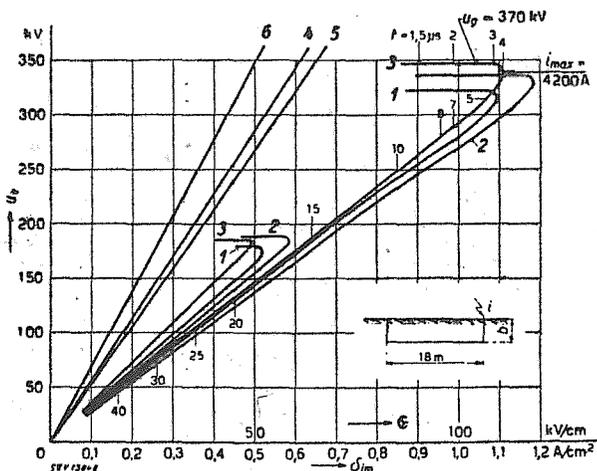


Fig. 18. — Courbes de la tension u_g à la prise de terre dans le terrain de Gösgen ($\rho \approx 100 \text{ k}\Omega : \text{cm}$) en fonction de la densité moyenne de courant δ_{im} ou de l'intensité moyenne de champ \mathcal{E} à l'électrode.

Électrode : fil de 18 m de longueur, 6 mm de diamètre ;
 u_g , tension du générateur, jusqu'à 370 kV.

Comportement sous choc :		Comportement sous 50 Hz :	
1,	profondeur $b = 20 \text{ cm}$, $F = 3\,460 \text{ cm}^2$;	4,	analogue à 1;
2,	" $b = 40 \text{ cm}$, $F = 3\,560 \text{ cm}^2$;	5,	" 2;
3,	" $b = 80 \text{ cm}$, $F = 3\,700 \text{ cm}^2$;	6,	" 3.

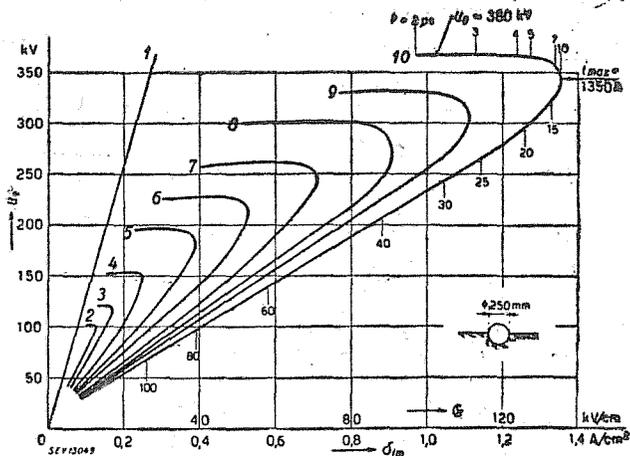


Fig. 19. — Courbes de la tension u_e à la prise de terre dans le terrain de Gösgen ($\rho \approx 100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) en fonction de la densité moyenne de courant σ_{im} ou de l'intensité moyenne de champ E à l'électrode.

Electrode : sphère de 250 mm de diamètre, $F = 980 \text{ cm}^2$;

u_e , tension du générateur, jusqu'à 380 kV.

1, sous courant alternatif 50 Hz; 2 à 10, sous choc.

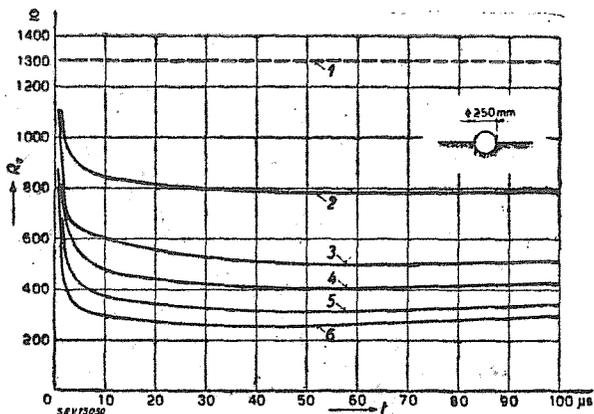


Fig. 20. — Résistance de prise de terre R_g en fonction du temps t pour des courants de choc de différentes intensités i dans le terrain de Gösgen ($\rho \approx 100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$).

Disposition d'essais comme sur la figure 19.

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1, sous 50 Hz; | 4, sous choc $i = 400 \text{ A}$; |
| 2, sous choc $i = 115 \text{ A}$; | 5, " $i = 700 \text{ A}$; |
| 3, " $i = 250 \text{ A}$; | 6, " $i = 100 \text{ A}$. |

Figure 21 et 22, pour un tube enfoncé à 20, 40, 80, 120, 220, 300 et 400 cm dans le sol.

Comme dans les chapitres précédents, les figures représentent la tension à la prise de terre en fonction de la densité de courant

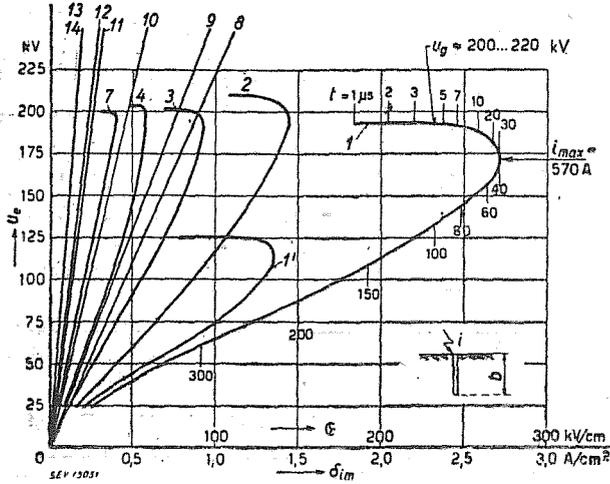


Fig. 21. — Courbes de la tension u_s à la prise de terre dans le terrain de Göszen ($\rho \approx 100 \text{ k}\Omega : \text{cm}$) en fonction de la densité moyenne de courant δ_{im} ou de l'intensité moyenne de champ E à l'électrode.

Électrode : tube de cuivre de 35 mm de diamètre;
 u_g , tension du générateur.

Comportement sous choc :

1, 1',	profondeur $b = 20 \text{ cm}$,	$F = 220 \text{ cm}^2$;
2,	" $b = 40 \text{ »}$,	$F = 440 \text{ »}$;
3,	" $b = 80 \text{ »}$,	$F = 880 \text{ »}$;
4,	" $b = 120 \text{ »}$,	$F = 1\,340 \text{ »}$;
5,	" $b = 220 \text{ »}$,	$F = 2\,420 \text{ »}$;
6,	" $b = 300 \text{ »}$,	$F = 3\,300 \text{ »}$;
7,	" $b = 400 \text{ »}$,	$F = 4\,400 \text{ »}$;

Comportement sous 50 Hz :

8,	analogue à 1, 1';
9,	" $2\hat{u}$
10,	" 3;
11,	" 4;
12,	" 5;
13,	" 6;
14,	" 7.

de l'électrode. Contrairement à l'électrode sphérique, où cette densité de courant dans un terrain homogène est constante à la surface de l'électrode, la densité de courant indiquée sur ces figures est la valeur *moyenne*, c'est-à-dire le quotient du courant par la surface de l'électrode en contact avec la terre. On peut calculer l'intensité de champ *moyenne* à l'électrode par multiplication avec la résistivité du sol d'environ $10^5 \Omega : \text{cm}$. Pour les courbes du courant le plus intense, les tensions du générateur de chocs

sont indiquées sur les figures, ainsi que quelques moments de la courbe. Cela permet de lire $\left(\frac{di}{dt}\right)$ pour chaque partie des courbes. Le courant total dans la prise de terre s'obtient en multipliant

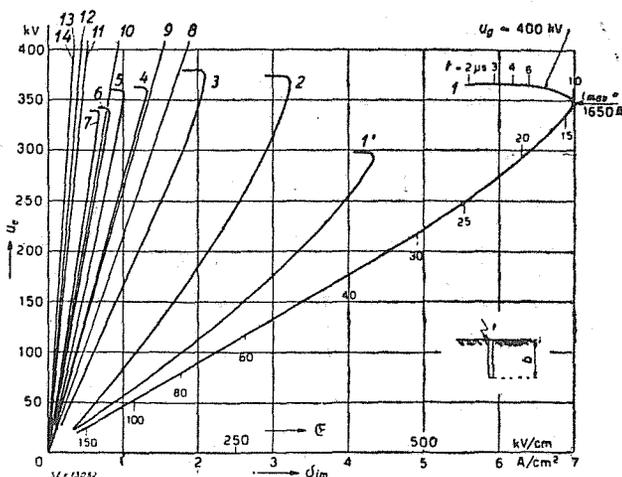


Fig. 22. — Courbes de la tension u_e à la prise de terre dans le terrain de Gösgen ($\rho \simeq 100 \text{ k}\Omega : \text{cm}$) en fonction de la densité moyenne de courant δ_{i_m} ou de l'intensité moyenne de champ \mathcal{E} à l'électrode.

Électrode : tube de cuivre de 35 mm de diamètre.

Comportement sous choc :

- 1, 1', profondeur $b = 20 \text{ cm}$, $F = 220 \text{ cm}^2$;
- 2, " $b = 40 \text{ "}$, $F = 440 \text{ "}$;
- 3, " $b = 80 \text{ "}$, $F = 880 \text{ "}$;
- 3, " $b = 120 \text{ "}$, $F = 1\ 340 \text{ "}$;
- 5, " $b = 220 \text{ "}$, $F = 2\ 420 \text{ "}$;
- 6, " $b = 300 \text{ "}$, $F = 3\ 300 \text{ "}$;
- 7, " $b = 400 \text{ "}$, $F = 4\ 400 \text{ "}$;

Comportement sous 50 Hz :

- 8, analogue à 1, 1' ;
- 9, " 2 ;
- 10, " 3 ;
- 11, " 4 ;
- 12, " 5 ;
- 13, " 6 ;
- 14, " 7.

la densité de courant par la surface indiquée de l'électrode. La valeur maximum atteinte par le courant est indiquée sur les figures, sur lesquelles sont également reportées les droites inclinées représentant les résistances mesurées de la manière habituelle en basse fréquence pour la disposition considérée de l'électrode. Les résultats des mesures sont groupés dans le Tableau III.

On constate les résultats suivants : Au point de vue électrique les électrodes de cuivre se comportent de la même façon que les électrodes de fer. Les courbes sont valables pour les deux métaux.

Ces courbes permettent à nouveau de constater une diminution

TABLEAU III.

Résistance de différentes électrodes dans le terrain de Gösgen.

Essai n°.....	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Électrode...	Tube enfoui à 40 cm	Tube enfoui à 400 cm	Tube enfoui à 400 cm	Plaque enfouie à 40 cm	Fil enfoui à 40 cm	Sphère Diamètre 250 mm
Genre de terrain.....	Gravier et sable recouvert d'un peu d'humus (100 kΩ : cm). Pour la couche supérieure (jusqu'à une profondeur d'environ 80 cm) $\rho \approx 30$ à 50 kΩ : cm.					
F (cm ²).....	440	4400	4400	9600	3600	980
$u_{g\max}$ (kV)...	env. 220	env. 220	env. 400	env. 400	env. 370	env. 380
$u_{e\max}$ (kV)...	210	200	345	365	340	360
$i_{e\max}$ (A).....	660	1800	3050	1690	4000	1350
T_{hl} (μs).....	210	90	25	41	16	51
$\delta_{i\max}$ (A : cm ²)..	1,5	0,41	0,7	0,175	1,1	1,35
ρ_m (kΩ : cm)...	100	100	100	100	100	100
\mathcal{E}_i (kV : cm)...	150	40	70	17,5	110	135
R_{c-}	600	255	255	325	147	1300
R_{c1}	—	—	—	—	—	300
R_{c2}	310	—	—	—	85	255
R_{c3}	260	105	110	220	75	240
$\frac{R_{c-}}{R_{c3}}$	2,3	2,4	2,3	1,5	1,95	5,4
Figures n°s...	21	21	22	17	18	19 et 20

 F , surface de contact à la sphère de 250 ou 500 mm (cm²); u_g , tension du générateur de chocs (kV); u_{c-} , tension de la prise de terre (kV); i_e , courant dans la prise de terre (A); T_{hl} , durée de mi-amplitude du courant de choc (μs); δ_i , densité de courant moyenne à la prise de terre, calculée (A : cm²); ρ , résistivité moyenne de la terre (kΩ : cm); \mathcal{E}_i , intensité de champ théorique à la sphère, calculée (kV : cm); R_{c-} , résistance de la terre à basse fréquence; R_{c1} — R_{c2} — R_{c3} , résistance de la terre sous choc à u_{\max} , i_{\max} et à résistance minimum.

de la résistance $\frac{u}{i}$ lorsque les densités de courant sont élevées. La différence par rapport aux droites inclinées représentant la résistance en basse fréquence est d'autant plus marquée que la densité de courant est plus élevée et que la répartition du courant sur la surface de l'électrode est moins homogène. La diminution est moindre pour les plaques (*fig. 17*) que pour les tubes (*fig. 21* et *22*). Au début, la tension à la prise de la terre atteint à peu près celle du générateur de chocs. La valeur critique de l'intensité de champ au-dessous de laquelle la résistance présente une valeur déterminée est nettement inférieure à une intensité de champ moyenne de 8 kV : cm (*fig. 17*) à l'électrode. Selon les mesures indiquées au chapitre précédent, l'écart commence dès que l'intensité de champ dépasse en un point quelconque de l'électrode la valeur de 3 kV : cm environ. Selon la figure 20, la résistance de la prise de terre diminue en quelques microsecondes à une fraction de la valeur en basse fréquence d'environ 1 300 Ω , dans le cas de la demi-sphère où le champ et le courant sont le mieux visibles. Cette diminution est d'autant plus forte que le courant est plus intense.

Selon les calculs, la résistance de terre diminue un peu au fur et à mesure que l'électrode est plus profondément enfouie. Outre cet effet de la profondeur, on a constaté à Gösgen que les couches superficielles sont relativement meilleures conductrices que les couches plus profondes, car elles renferment plus d'humus et d'acides de plantes.

D'autre part, l'essai avec le fil étendu (*fig. 18*) a montré que la résistance ne diminuait que fort peu pour les densités de courant entrant en ligne de compte et qu'il se produisait même une *augmentation* de la résistance par rapport à la valeur mesurée en basse fréquence. Ce phénomène s'explique par la *longueur* considérable de l'électrode, pour les raisons indiquées au chapitre suivant.

III. — MESURE D'ÉLECTRODES DE TERRE FILIFORMES DANS LE TERRAIN DE GÖSGEN.

La disposition prévue pour ces mesures est représentée sur la figure 23. Il a été fait usage :

- a. D'un fil de fer de 110 m de longueur et de 6 mm de diamètre, surface d'environ 20 500 cm²;
- b. D'un fil de cuivre de 110 m de longueur et de 5 mm de diamètre, surface d'environ 17 000 cm².

Le fil était posé en arc ouvert dans le terrain très caillouteux de Gösgen, la distance entre la prise de terre du générateur de chocs et les masses métalliques les plus proches dans le sol attei-

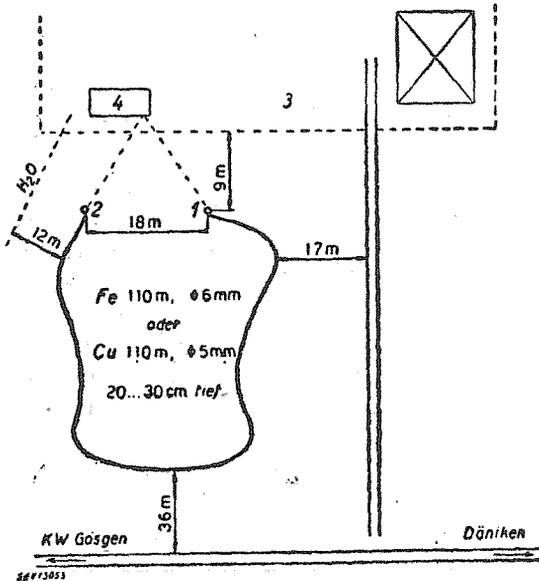


Fig. 23. — Disposition pour l'essai d'électrodes de terre étendues en fil de fer de 6 mm de diamètre ou de cuivre de 5 mm de diamètre, de 110 m de longueur, enfoui de 20 à 30 cm dans le terrain caillouteux de Gösgen.

- 1, 2, commencement et fin du fil d'électrode;
3, emplacement de la station d'essais; 4, générateur de chocs.

gnant 9 et 12 m. La profondeur d'enfouissement étant de 20 à 30 cm. Les deux extrémités du fil pouvaient être à volonté soumises individuellement ou ensemble au choc. La tension fut mesurée à différents endroits du fil.

Le fil fut ensuite coupé en deux et en quatre tronçons de 55 et 28 m de longueur, qui furent soumis à leur tour à des chocs et mesurés. Enfin, ces tronçons furent eux-mêmes divisés en 8×11 m, disposés sous forme de prise de terre en étoile (« patte de corbeau ») selon la figure 24, dont on essaya sous choc :

- a. Tous les rayons 1 à 8;
- b. Les rayons 1 + 3 + 5 + 7;
- c. Les rayons 1 × 7;
- d. Le rayon 7 seul.

A la suite de ces mesures de prise de terre où l'inductance de l'électrode avait une très grande importance, les valeurs de l'inductance furent mesurées sous choc pour un fil étendu horizontalement

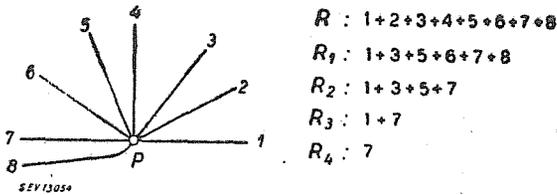


Fig. 24. — Disposition pour l'essai d'une prise de terre en étoile (« patte de corbeau ») dans le terrain de Gösgen.

Électrodes : fils de 5 et 6 mm de diamètre, d'une longueur de 11 m chacun.

et verticalement avec ligne de retour de terre, ainsi que pour un pylône en fer de 14 m de hauteur.

Les résultats des mesures sont représentés par les courbes des figures 25 à 28 pour la prise de terre de 110 m de longueur, de la même façon que celle indiquée aux chapitres précédents. La figure 29 indique la résistance (quotient $\frac{u}{i}$) pour un courant de choc périodique. Pour un courant oscillant, ce quotient prendrait toutes les valeurs comprises entre $+\infty$ et $-\infty$.

Enfin ces résultats sont groupés dans le Tableau IV pour le fil de 110 m de longueur et pour les tronçons de 55,28 et 11 m.

Lors de ces mesures, on n'a pas non plus constaté de différences dans le comportement des fils de cuivre et de fer. En raison de la dispersion inévitable des valeurs ohmiques de plusieurs prises de terre de même forme, de petites différences éventuelles ne sauraient être attribuées à l'influence du métal.

Les courbes des figures 25 à 28 ont la forme de boucles d'hystérésis allant de gauche à droite. Leur forme est toutefois sensiblement différente et les débuts des boucles se trouvent nettement au-dessus des droites de résistance mesurées en basse fréquence, par rapport aux mesures effectuées précédemment sur des prises de terre localisées (fig. 25 et 26). Pour plus de précision, deux oscillogrammes ont été reproduits sur les figures 27 et 28. Contrairement au cas des prises de terre localisées, le courant et la tension ne passent plus

TABLEAU IV. — Résistances de longs fils de terre en fer, de 6 mm de diamètre.

Essai n°.....	1.	2.	3.	4.	5.
Longueur du fil d'électrodes....	110 m	110 m	55 m	28 m	11 m
Choc.....	unilatéral	bilatéral	unilatéral	unilatéral	unilatéral
Surface (cm ²)....	26 500	20 500	10 200	5 100	2 100
R_{e_0}	25,5	25,5	45	92	133
$u_{a \max}$ (kV).....	290	222	295	395	450
$u_{b,a}$ (kV).....	70	150	170	360	450
$u_{b \max}$ (kV).....	117	172	210	366	450
$u_{a,b}$ (kV).....	117	192	240	380	450
$i_{t \max}$	8100	9250	7850	6400	4300
i_{ta} (A).....	7300	8400	7800	6350	4270
$\left(\frac{di}{dt}\right)_0$ (A : μ s)....	4:5000	4:5000	4:5000	4:5000	2:3000
$\frac{u_{a \max}}{i_{ta}}$ (Ω).....	40	26,5	38	62	105
$\frac{u_{a \max}}{u_{b,a}}$	4,2	1,5	1,75	1,1	1,0
$\frac{u_{a \max}}{u_{b \max}}$	2,4	1,26	1,35	1,1	1,0

Remarque : Tension du générateur de chocs 650 kV environ.

R_{e_0} , résistance de prise de terre à 50 Hz;

$u_{a \max}$, maximum de tension à l'extrémité du fil soumise au choc (kV);

$u_{b \max}$, maximum de tension à l'extrémité libre du fil (kV);

$u_{a,b}$, tension de l'extrémité du fil soumise au choc, au moment de $u_{b \max}$ (kV);

$i_{t \max}$, maximum de courant (A);

$\left(\frac{di}{dt}\right)_0$, raideur initiale maximum du courant (A : μ s).

simultanément par zéro, mais sont nettement déphasés. Cela s'observe surtout pour le fil de 110 m soumis à un choc unilatéral (fig. 27), mais moins nettement pour le fil soumis à un choc bilatéral (fig. 28). Des mesures de la tension à différents points du fil permettent d'établir la distribution de la tension le long du fil.

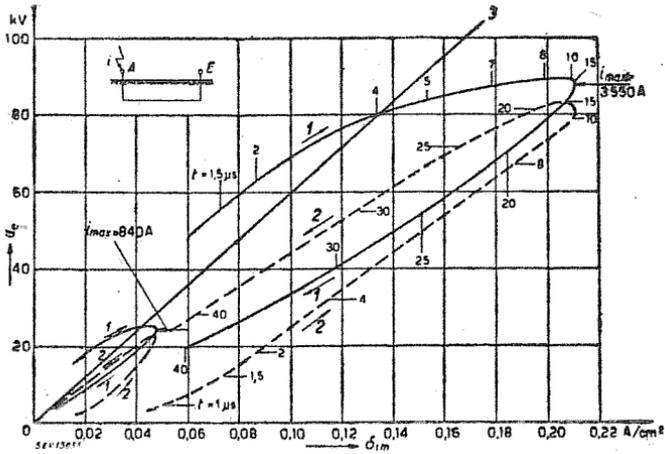


Fig. 25. — Courbes de la tension u_c au fil de prise de terre, en fonction de la densité moyenne de courant δ_{im} dans le fil.

Électrode : fil de cuivre de 5 mm de diamètre et de 110 m de longueur;

$$F = 17\,000\text{ cm}^2.$$

- 1, tension au commencement du fil A; 2, tension à l'extrémité ouverte du fil E; 3, tension sous courant alternatif 50 Hz ($R_c \approx 35\ \Omega$).
Les flèches indiquent le sens d'inscription des courbes.

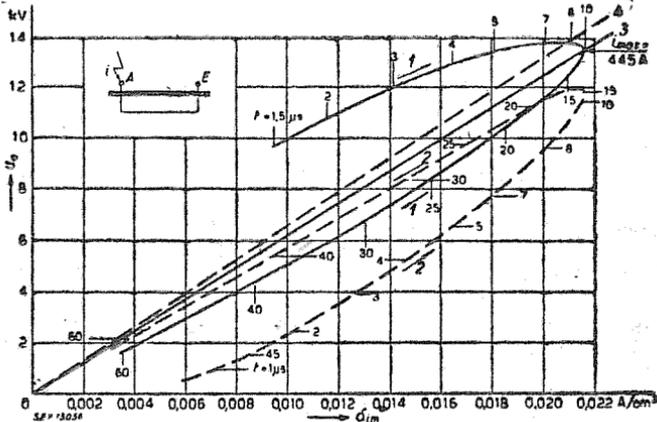


Fig. 26. — Courbes de la tension u_c au fil de prise de terre, en fonction de la densité moyenne de courant δ_{im} dans le fil.

Électrode : fil de fer de 6 mm de diamètre et de 110 m de longueur;

$$F = 20\,5000\text{ cm}^2.$$

- 1, tension au commencement du fil A; 2, tension à l'extrémité ouverte du fil E; 3, tension aux points A et E reliés; 4, tension sous courant alternatif 50 Hz ($R_c \approx 32\ \Omega$).

Lors d'un choc unilatéral (fig. 27) la grande différence de potentiel le long du fil est particulièrement marquée au premier moment t_1 . Tant que le courant varie, il existe une différence de potentiel

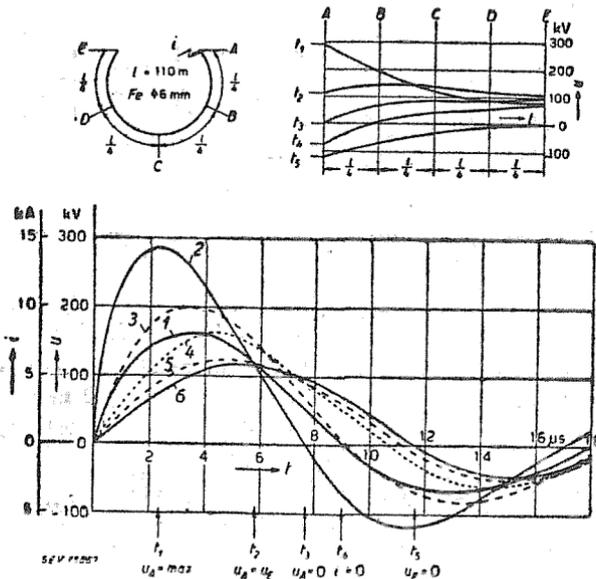


Fig. 27.

En bas : variation de la tension et du courant en fonction du temps t ; en haut : répartition de la tension à différents temps t_1 à t_5 , pour un fil de prise de terre en fer de 6 mm de diamètre.

$$F = 20\,500 \text{ cm}^2, \quad R_{\text{ext}} \approx 25,5 \, \Omega.$$

1, courant au commencement du fil A; 2, tension au commencement du fil A; 3, tension au quart de la longueur du fil B; 4, tension à la moitié de la longueur du fil C; 5, tension aux trois-quarts de la longueur du fil D; 6, tension à l'extrémité ouverte du fil E.

t_1 à t_5 , temps pour lesquels la figure du haut indique la répartition de la tension le long du fil de prise de terre.

le long du fil. La cause provient donc de la chute de potentiel inductive du courant de choc le long du fil. C'est effet est si net, qu'au moment t_1 , par exemple, où aucun courant n'est appliqué au fil, la tension est négative au commencement du fil et positive à l'autre extrémité. Cela signifie qu'à ce moment-là du courant passe dans la terre à l'extrémité du fil, pour revenir par la terre au commencement du fil. Il s'agit d'un courant circulaire qui

n'est maintenu que par l'inductance ou l'énergie magnétique du fil.

Cette inductance du fil ou la chute de potentiel qui s'y établit lors de l'application d'un courant provoque également l'augmen-

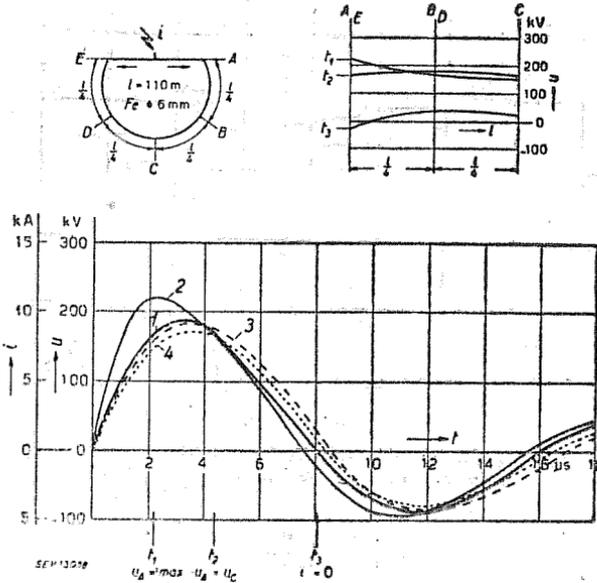


Fig. 28.

En bas : variation de la tension et du courant en fonction du temps t ; en haut : répartition de la tension à différents temps t_1 à t_3 , pour un fil de prise de terre en fer de 6 mm de diamètre, dont les extrémités A et E sont reliées.

$$F = 20\,500 \text{ cm}^2, \quad R_e \approx 25,5 \Omega.$$

1, courant dans l'amenée de courant à A et E; 2, tension aux points A et E; 3, tension au quart de la longueur du fil B ou D; 4, tension à la moitié du fil C.

t_1 à t_3 , temps pour lesquels la figure du haut indique la répartition de la tension le long du fil de prise de terre.

tation initiale de la résistance par rapport à la valeur mesurée en basse fréquence r_{e0} (fig. 25, 26 et 29). Le Tableau IV montre qu'aux raideurs de courant disponibles de 4 à 5 kV; μs les tronçons de fil d'environ 30 m se comportent encore comme une prise de terre localisée, mais que des fils de 55 m de longueur sont déjà nettement inductifs, c'est-à-dire qu'ils présentent une augmentation apparente de la résistance, due à la chute de potentiel inductive de l'électrode de prise de terre elle-même.

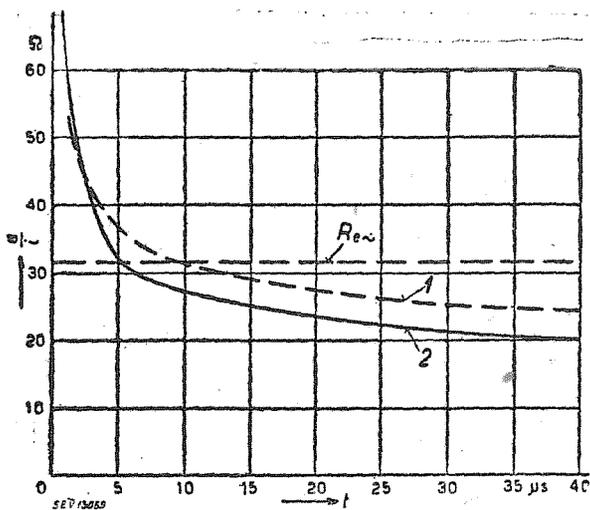


Fig. 29. — Courbes représentant la résistance de terre u_e : i pour un fil de fer de 6 mm de diamètre et de 110 m de longueur.

$$F = 20\,500 \text{ cm}^2.$$

- 1, sous choc $i = 450 \text{ A}$; 2, sous choc $i = 3\,600 \text{ A}$;
3, sous courant alternatif 50 Hz ($R_{e-} \approx 32 \Omega$).

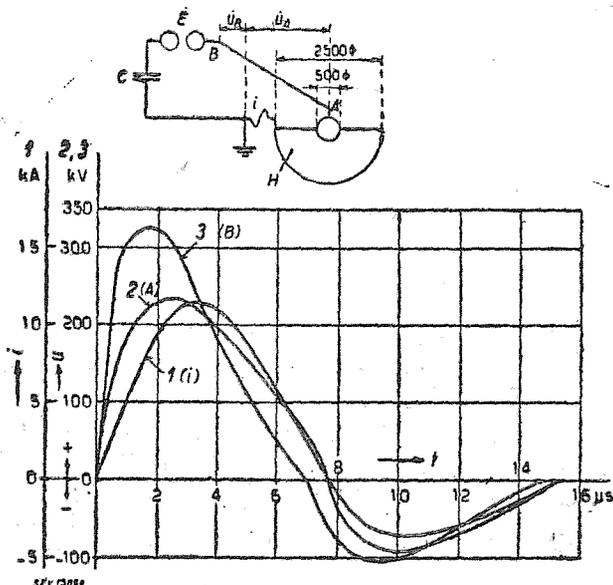


Fig. 50. — Variation de la tension et du courant en fonction du temps t à la sphère de prise de terre dans le modèle hémisphérique, avec ligne d'amenée de 16 m de longueur.

Électrolyte : humus humide (H), $\rho \approx 12\,500 \Omega \cdot \text{cm}$.

$$F = 3\,920 \text{ cm}^2, \quad R_{e-} = 64 \Omega.$$

C, E, capacité et éclateur du générateur de chocs; A, B, ligne d'amenée en cuivre de 6 mm de diamètre et de 16 m de longueur. 1, courant dans le modèle de prise de terre; 2, tension à la prise de terre (point A); 3, tension à la prise de terre + ligne d'amenée (point B).

Si l'inductance d'une électrode de terre filiforme est déjà apparente, on peut naturellement s'attendre à ce que cela soit encore plus marqué pour les lignes d'amenée à la prise de terre, qui se trouvent dans l'air.

La figure 30 montre un oscillogramme dans le cas de la disposition selon le Chapitre II (bassin hémisphérique) avec une ligne d'amenée de 16 m de longueur, en fil de cuivre de 6 mm de diamètre, dessinée sur la figure. La tension avant l'amenée de courant est beaucoup plus élevée que la tension à la prise de terre elle-même. Une différence typique entre les deux tensions est en outre caractérisée par le passage du courant par zéro. La tension à l'électrode s'y annule, tandis que la tension avant l'amenée de courant est nettement déphasée et passe par zéro avant le courant. Dans le cas du fil d'amenée de 16 m de longueur, on y constate des chutes de potentiel dépassant 100 kV, lors d'un accroissement de courant d'environ 5 kA : μ s. Il va donc de soi qu'en négligeant les chutes de potentiel, on peut commettre de grosses erreurs lors des mesures des prises de terre. C'est probablement la raison pour laquelle on prétend constamment qu'il se produit une augmentation de la résistance en cas de choc.

A ce propos, l'indication de quelques valeurs d'inductance peut présenter un certain intérêt :

Un fil de cuivre de 13,9 m de longueur et de 6 mm de diamètre présente une inductance de 23 ou 25 μ H, selon qu'il est tendu verticalement à partir du sol ou horizontalement à 0,3-1,5 m au-dessus du sol; ce qui correspond à une inductance de 1,66 et 1,8 μ H : m.

Un pylône en fer selon la figure 31, de même hauteur que le fil ci-dessus (13,9 m), a une inductance totale de 11,1 μ H, soit 0,80 μ H : m, c'est-à-dire à peine la moitié de l'inductance d'un fil. La pose d'un fil de terre en cuivre de 6 mm de diamètre à l'intérieur du pylône ne modifie guère cette valeur.

La résistance d'une prise de terre en étoile ne diminue pas dans la même mesure que l'augmentation du nombre des rayons, car l'écoulement des courants n'a pas lieu librement. La figure 32

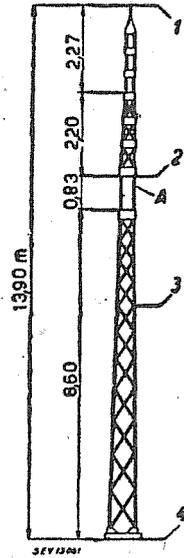


Fig. 31.

Croquis du pylône en fer essayé.

montre le résultat de mesures en basse fréquence pour la disposition, selon la figure 24. Il n'est pas indiqué de prévoir plus de quatre rayons, car la résistance ne diminue plus ensuite que

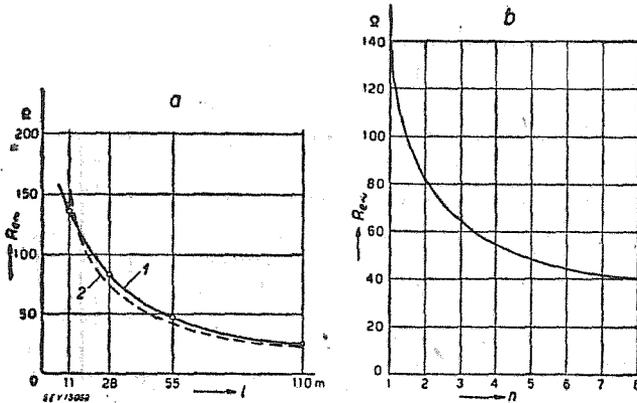


Fig. 32. — Résistance de prise de terre étendues dans le terrain de Gösgen ($\rho \simeq 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$):

a. en fonction de la longueur l d'un fil (fil $2r = 6 \text{ mm}$ de diamètre, à 25 cm de profondeur b): 1, valeurs mesurées; 2, valeurs calculées $R_c = \frac{\rho}{2\pi l}$ en $\left(\frac{2rb}{l^2}\right)$.

b. en fonction du nombre de rayons de 11 m de longueur chacun.

faiblement. Toutefois, au point de vue de la réduction de l'inductance un accroissement du nombre des rayons est favorable. Dans le cas limite d'une plaque métallique pleine ou d'un grillage à mailles étroites avec arrivée du courant au centre, l'inductance serait réduite à une valeur négligeable.

IV. COMPARAISONS DES RÉSISTANCES DE PRISES DE TERRE

MESURÉES SOUS CHOC ET EN BASSE FRÉQUENCE.

La plupart des mesures de résistances de terre en basse fréquence mentionnées dans ce rapport ont été exécutées à 50 Hz , le courant et la tension étant mesurés à la prise de terre (par voltmètre et ampèremètre). On a toujours mesuré la somme des résistances de la prise de terre à essayer et de la prise de terre du générateur

de chocs. La valeur de cette dernière, qui n'atteint que 1 à 1,5 Ω ne joue généralement pas un rôle important et il est facile d'en tenir compte. La comparaison avec les mesures obtenues à l'aide d'un instrument « Terrafix » a constamment montré une bonne concordance. Ainsi, pour une prise de terre avec 110 m de fil de fer de 6 mm de diamètre :

Méthode a :

Voltmètre et ampèremètre. $R_e + R_{eg} \simeq 24,8 \Omega$

Méthode b :

Terrafix. $R_e + R_{eg} \simeq 24,9$

Méthode c :

Terrafix avec terre auxiliaire. . . . $R_e \simeq 24 \text{ à } 24,5$

Lorsque la prise de terre auxiliaire n'est pas beaucoup plus mauvaise que la terre à mesurer, la concordance avec les méthodes à basse fréquence utilisées a toujours été satisfaisante, ainsi qu'on a déjà pu le constater en d'autres occasions où il avait également été fait usage d'autres dispositifs de mesure.

V. — CONCLUSIONS.

Le comportement de prises de terre lors du passage de courants de chocs raides et de grande intensité, à la suite d'un coup de foudre par exemple, est décrit dans ce rapport sur la base d'essais très détaillés entrepris durant la guerre à la Station d'essais de la Commission de l'A. S. E. et de l'U. C. S. pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH). Les résultats essentiels sont les suivants :

1° Quand la densité de courant à l'électrode de prise de terre ne provoque pas une intensité de champ dépassant 2,5 à 3 kV : cm, le comportement des prises de terre localisées (tubes, plaques, courts rubans, etc.) sous choc peut être déterminé par une mesure de la résistance de terre à l'aide des méthodes habituelles.

2° Lorsque l'intensité de champ est plus élevée, le rapport entre la tension et le courant à la prise de la terre diminue d'une manière imprécise. La terre se comporte dans ce cas d'une façon analogue à une résistance variable de parafoudre. On a affaire à des courbes d'hystérésis d'autant plus ouvertes que le courant dure plus longtemps et est plus intense,

3° Pour des prises de terrain on localisées (fils ou rubans de plus de 30 m de longueur), il se présente dans le front du choc de courant une augmentation de potentiel. L'effet en est que la valeur ohmique $\left(\frac{u}{i}\right)$ de la résistance de terre qu'on observe sous choc dépasse la valeur mesurée en basse fréquence. Ce fait provient de la chute de potentiel inductive le long de l'électrode de prise de terre. Il se produit également dans ce cas des boucles d'hystérésis dues toutefois à l'inductance.

4° Ce même accroissement apparent de la résistance de terre sous choc que pour des terres filiformes s'observe également lorsque la résistance de terre au choc n'est pas mesurée directement à l'électrode, mais en un point d'une amenée venant du générateur de chocs. Quelques exemples sont donnés dans le cas de la chute de potentiel inductive dans de tels fils d'amenée ou dans des pylônes métalliques.

5° Le métal de l'électrode de terre ne joue pratiquement aucun rôle au point de vue du comportement électrique. On a mesuré les mêmes courbes pour le cuivre que pour le fer.

BIBLIOGRAPHIE.

- H. M. TOWNE, *Gen. El. Rev.*, vol. 31, 1928, p. 605.
 L. BINDER, *Gewittertagung der Sachs. Werke*, Dresden, 1932.
 L. V. BEWLEY et I. H. HAGENGUTH, *El. World*, 1935.
 H. NORINDER et R. NORDELL, *C. I. G. R. É.*, n° 302, 1939.
 MÜNGER et HUMMEL, *Bull. A. S. E.*, 1940.
 F. OLLENDORF, *Erdströme*, Springer, 1923.