Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 25 (1934)

Heft: 15

Artikel: Recherches sur la résistance de passage à la terre dans divers genres de terrains et calcul prélable des électrodes des terres

Autor: Sprecher, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056565

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVe Année | N° 15 | Vendredi, 20 Juillet 1934

Recherches sur la résistance de passage à la terre dans divers genres de terrains et calcul préalable des électrodes des terres

par *E. Sprecher*, Entreprises Electriques du Canton de Zurich.

621.316.993

Les Entreprises électriques du canton de Zurich (EKZ) ont examiné au point de vue théorique et expérimental la question importante de savoir comment dimensionner et établir une installation de mise à la terre pour qu'elle satisfasse aux conditions requises de la nouvelle ordonnance fédérale sur les installations électriques à fort courant, c'est-à-dire pour que la résistance de passage à la terre ne dépasse en aucun cas les valeurs maximums prescrites. Ces recherches, faites en collaboration avec un géologue, sont décrites dans l'article ci-dessous. Elles ont conduit à une méthode pratique permettant de calculer d'avance les installations de mise à la terre. Le calcul préconisé est illustré par un exemple pratique.

Die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ untersuchten theoretisch und experimentell die wirtschaftlich wichtige Frage, wie eine Erdungsanlage gebaut und dimensioniert werden muss, damit ihr Erdungswiderstand mit einiger Sicherheit einen bestimmten, z. B. durch die neuen bundesrätlichen Verordnungen über elektrische Anlagen vorgeschriebenen Wert nicht überschreitet. Ueber diese Untersuchungen, zu denen auch ein Geologe zugezogen wurde, wird im folgenden berichtet. Sie ergaben eine brauchbare Methode der Vorausberechnung von Erdungsanlagen; an einem Beispiel wird dies gezeigt.

I.

Pour qu'une mise à la terre puisse jouer le rôle d'une protection contre les tensions de contact dangereuses ou contre les surtensions, sa résistance doit être dimensionnée en tenant compte du courant à la terre. Dans ce but, les nouvelles ordonnances fédérales suisses sur les installations électriques renferment non seulement des indications sur les dimensions des électrodes des terres (désignées simplement par «électrodes» dans cet article), mais prescrivent également la valeur maximum admissible de la résistance de passage à la terre, ou, ce qui revient au même, la valeur maximum admissible de la chute de tension pour un courant à la terre donné. Lors de la construction d'une installation de mise à la terre, on doit donc rechercher quelle est l'électrode correspondant à une résistance de passage à la terre donnée.

La résistance d'une mise à la terre se compose de la résistance des conducteurs métalliques c'est-à-dire de la ligne de terre et de l'électrode et de celle du sol entourant l'électrode. La première est généralement très faible par rapport à la seconde, de sorte qu'on n'en tiendra pas compte dans ce qui suit. La résistance du sol entourant l'électrode dépend de la forme et des dimensions de l'électrode, de sa disposition dans le sol et de la conductibilité spécifique de ce dernier. Une fois les conditions adoptées, la résistance de passage à la terre d'une électrode peut donc être calculée d'avance. On trouvera dans la littérature correspondante de plus amples détails à ce sujet [1]).

En pratique, on se heurtera toutefois souvent à certaines difficultés au cours des calculs préalables, par le fait que l'on ne connaît pas la conductibilité, resp. la résistance spécifique du terrain considéré. Il est vrai que des recherches ont déjà été faites dans ce domaine [2]). On a constaté que la résistance spécifique dépend non seulement de la nature du terrain, mais également de sa teneur en eau, de la température et de la pression du sol, de sorte qu'elle peut varier fortement. Comme on ignore les conditions du terrain dans lequel l'électrode doit être placée, il n'est pas possible d'utiliser ces données pour un cas bien déterminé. Le chef d'entreprise pourra souvent obvier à cette incertitude en dimensionnant l'électrode sur la base d'une autre électrode de dimensions et de résistance connues, placée dans un terrain de même nature. Sinon, il se basera sur sa propre expérience et tentera un essai. Tant qu'il ne s'agit que d'un petit nombre d'électrodes, cela ne présente pas d'inconvénients. Par contre, si en vertu de l'art. 27 de l'ordonnance fédérale sur les installations à fort courant on a chaque année des centaines d'électrodes à contrôler pour ramener leur résistance de passage à la terre dans les limites prescrites, soit dans de nouvelles installations, soit lors de revisions, et si l'on

[1]) Voir par exemple Ollendorf, Erdströme (Courants de terre), Berlin, Jul. Springer, 1928.

[2]) Ruppel, ETZ 1913, page 1221.

considère combien de complications et de frais supplémentaires occasionne l'amélioration de mises à la terre insuffisantes, on comprend qu'il est nécessaire de pouvoir calculer au préalable la résistance de passage à la terre des électrodes. Il va de soi que les inégalités du sol rendent plus ou moins aléatoire la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Toutefois, dans certaines conditions, on peut pratiquement obtenir des valeurs suffisamment rapprochées. Dans ce qui suit, nous indiquerons une méthode qui permet d'obtenir de bons résultats dans de nombreux cas.

Lorsqu'une électrode de forme simple et de dimensions connues est placée dans un terrain homogène, la résistance spécifique du terrain se détermine par une mesure directe de la résistance de passage à la terre. On peut ainsi calculer la résistance de passage d'une électrode d'autres dimensions à placer au même endroit, procédé qui a déjà été adopté fréquemment pour les grandes installations de mise à la terre. L'électrode d'essai n'a pas besoin d'être grande. Une barre métallique de 30 à 50 cm de longueur et de 10 à 30 mm de diamètre suffit dans la plupart des cas; ces dimensions sont généralement déterminées par l'étendue de mesure de l'instrument utilisé et par la nature du terrain. La résistance spécifique ainsi déterminée est valable pour l'instant où la mesure a été effectuée. Toutefois, l'ordonnance sur les installations à fort courant prescrit en général (par exemple art. 21, chiffre 2, et art. 23, chiffre 2) que la valeur indiquée de la résistance de passage à la terre ne doit être dépassée dans n'importe quelle circonstance prévisible. Il faut donc déterminer en outre l'effet des conditions atmosphériques sur la résistance, en répétant les mesures à plusieurs reprises sur une électrode posée à demeure et en tenant compte de la température et des précipitations. Pour le calcul d'une électrode à placer dans un terrain de cette nature, on se basera alors sur la valeur maximum obtenue pour la résistance spécifique.

Il est naturellement impossible de procéder à des essais d'électrodes dans tous les terrains de natures différentes qui entrent en ligne de compte pour les mises à la terre. On doit se borner à quelques terrains caractéristiques. La configuration géologique d'un pays montre d'ailleurs que de grandes parties du territoire de distribution d'un réseau électrique présentent très souvent un terrain de même nature, surtout aux endroits où les mises à la terre sont les plus nombreuses. Ainsi, par exemple, le fond des grandes vallées ne se compose souvent que d'un sol graveleux. Si on laisse de côté les terrains dans lesquels on n'a que peu d'électrodes à poser, on peut se borner à un nombre relativement faible d'électrodes de mesure. Par un choix judicieux de leur emplacement, les frais d'installation et de service peuvent être réduits au minimum.

Les mesures périodiques effectuées à ces endroits d'essai servent non seulement à déterminer la résistance spécifique d'un terrain d'une certaine nature, mais aussi à constater la valeur des variations provoquées par les conditions atmosphériques, ce qui a son importance. Des résultats de mesure, sur lesquels nous reviendrons dans la suite, ont montré que les variations de la résistance spécifique ont lieu selon une loi identique pour de nombreuses électrodes à des profondeurs approximativement égales, pour autant que les conditions climatériques et météorologiques soient les mêmes. Les valeurs maxima se présentent au cours d'un été sec ou lors des grands froids, les valeurs minima après une longue période de pluies. On peut admettre en outre que l'importance des variations (exprimées par exemple en pourcents de la valeur moyenne annuelle) est approximativement la même pour les terrains de même nature, par exemple pour les terrains argileux. Il suffit donc de procéder, à de courts intervalles, à des mesures sur une seule électrode d'essai et de ne déterminer les résistances aux autres électrodes que lorsque les valeurs-limite et les valeurs moyennes se présentent. Une fois cela déterminé, les électrodes d'essai peuvent être supprimées et l'on ne conserve que l'électrode mentionnée. Les données de cette électrode d'essai fournissent constamment une indication sur la variation des valeurs de la résistance.

Les valeurs de la résistance spécifique déterminées aux électrodes d'essai ne peuvent toutefois pas être utilisées directement pour les calculs des électrodes à placer aux autres endroits, car la résistance d'un terrain est fortement influencée par de légères différences dans sa composition. On doit donc dans chaque cas déterminer à l'aide d'une sonde la résistance spécifique du terrain considéré à la profondeur prévue, avant la mise en place de l'électrode. Une comparaison avec l'un des terrains examinés fournit des données sur la variation des valeurs de la résistance que l'on peut admettre pour ce terrain, tandis que l'électrode d'essai permanente indique de combien sa résistance mesurée au même instant s'écarte de la valeur moyenne annuelle et de la valeur limite. En comparant ces deux indications, on peut ainsi déterminer avec une assez grande exactitude la valeur de la résistance spécifique du terrain considéré. Nous indiquons plus loin un exemple à ce sujet. Pour bien montrer la nécessité de procéder de cette manière, nous ajouterons que la résistance spécifique des terrains examinés a varié de 1 : 1,5 à 1 : 4, sous l'effet des conditions atmosphériques. Il ne faut pas oublier que les indications fournies par l'électrode de mesure ne sont valables, comme nous l'avons dit, que pour des contrées présentant à peu près les mêmes conditions atmosphériques. Au cas où celles-ci varieraient fortement dans le même territoire de distribution, leur effet peut être déterminé par l'installation d'une seconde électrode d'essai, en un lieu approprié. Les valeurs de la résistance des électrodes enfouies à plus de 1 m sont d'ailleurs peu influencées par les précipitations locales, telles que les averses par exemple. Des variations supérieures à

l'erreur de mesure ne peuvent se présenter qu'en cas de précipitations continuelles.

II.

Il y a quelques années, les services électriques du canton de Zurich ont entrepris des mesures s'étendant sur une longue période et sur un assez grand nombre d'électrodes d'essai. Nous donnons ci-après quelques détails sur les résultats obtenus.

Les genres de terrains utilisés dans le canton de Zurich pour la pose des électrodes sont principalement d'origine glaciaire et mollassique. Parmi les dépôts de l'époque glaciaire, on devait considérer les moraines, les graviers et l'argile; parmi les dépôts de l'époque mollassique, le «nagelfluh» et le grès entrent en ligne de compte. En outre, on a examiné, dans le calcaire des Lägern (Jura), le plus ancien sédiment, et dans la tourbe le sédiment le plus récent. Sur l'avis de M. le Dr. Hug, géologue, des électrodes d'essai ont été installées aux endroits suivants:

Tableau I.

No. de l'endroit de mesure	Désignation locale	Désignation géologique	Lieu
1	Terre pierreuse	Moraine superficielle de la dernière époque glaciaire	Thalwil i. Brand
2	Terre pierreuse	Moraine de fond	Affoltern a. A.
3	Gravier (peu au-dessus des eaux souterraines)	Gravier de l'époque glaciaire	Dietikon
4	Gravier (parfois dans les eaux souterraines)	Gravier de l'époque glaciaire	Dietikon
5	Gravier (bien au-dessus des eaux souterraines)	Gravier de l'époque glaciaire	Gare de Hüntwangen (Raffzerfeld)
6	Argile	Argile de fond de lac de la dernière époque glaciaire	Oberglatt
7	Tourbe	Tourbe	Kempten-Wetzikon
8	Mollasse	Grès de la mollasse d'eau douce supérieure	Rüti-Zürich
	Dans la suite ont encore été examinés:		
9	«Nagelfluh»	Nagelfluh (poudingue) molassique	Hombrechtikon
10	Calcaire des Lägern	Calcaire jurassique	Regensberg

Les électrodes étaient constituées par des tubes galvanisés de 0,5 m² de surface, enfoncés dans le sol. Pour les électrodes 1 à 8, les tubes avaient un diamètre de 12,8 cm et une longueur de 125 cm; pour les électrodes 9 et 10, le diamètre était de 8 cm et la longueur de 2 m. A chaque endroit de mesure, il y avait trois électrodes distantes d'environ 20 m. Ce nombre était déterminé d'une part par la méthode utilisée pour les mesures, car dans la plupart des cas on a dû avoir recours à la méthode des ponts de mesure avec écouteur téléphonique (méthode de Nippold), qui exige deux électrodes auxiliaires. D'autre part, on désirait pouvoir déterminer l'effet d'inégalités dans le même terrain, grâce à des mesures sur des électrodes disposées de la même manière. Enfin, on voulait pouvoir constater l'effet de la profondeur d'enfouissement sur la résistance, en utilisant un autre genre d'installation de l'électrode. Pour déterminer les écartements entre électrodes, on a tenu compte du fait que, pour des électrodes de telles dimensions, la résistance de passage à la terre est représentée, à quelques pourcents près, par la résistance d'une hémisphère de 10 m de rayon, au centre de laquelle se trouve l'électrode. Les tubes de 125 cm de longueur ont été enfouis perpendiculairement dans le sol. A chaque endroit de mesure, deux des tubes étaient enfouis de telle sorte que leur extrémité supérieure se trouvait à 70—90 cm au-dessous de la surface du terrain, tandis que l'extrémité supérieure du troisième tube ne se trouvait qu'à quelques cm au-dessous de la surface. Les tubes des endroits de mesure 9 et 10 ont été enfouis horizontalement à une profondeur de 50 à 90 cm. Dans tous les cas, la terre enlevée a été examinée, la position des couches notée et la terre remise en place exactement selon les couches primitives. Les électrodes des endroits 1 à 8 furent mises en place en automne 1928. Les résultats des mesures se rapportent aux années 1929 et 1930. Aux endroits 9 et 10, les mesures ont eu lieu en 1930 et 1931. La résistance spécifique du sol a été déterminée en partant des formules suivantes:

Soient R la résistance cherchée en ohms, ϱ la résistance spécifique rapportée à une section de 1 cm² et à une longueur de 1 cm, en ohms $\cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$, l la longueur du tube ou du ruban en cm, d le diamètre du tube en cm et t la profondeur d'enfouissement jusqu'au milieu du tube ou du ruban, en cm. On a alors [3]):

a) pour le tube enfoui, perpendiculairement dans le sol selon la figure la, lorsque l est beaucoup plus grand que $\frac{d}{2}$

Fig. 1a.

$$R = \varrho \cdot \frac{2{,}3 \lg \frac{4\,l}{d}}{2\,\pi\,l}$$

b) pour le tube enfoui perpendiculairement dans le sol selon la figure 1b, lorsque l est beaucoup plus grand que d, et t beaucoup plus grand que $\frac{l}{4}$

Fig. 1b.

$$R = \varrho \cdot \frac{2{,}3 \lg \frac{2\,l}{d} + \frac{2{,}3}{2} \lg \frac{2\,t + \frac{l}{2}}{2\,t - \frac{l}{2}}}{2\,\pi\,l}$$

c) pour le tube ou le ruban dressé enfoui horizontalement dans le sol selon la figure 1c (pour du ruban plat de largeur b, d $= \frac{b}{2}$

Fig. 1c.

[3]) Ollendorf, loc. cit.

1° lorsque l est beaucoup plus grand que d, et t beaucoup plus petit que $\frac{l}{4}$

$$R = \varrho \cdot \frac{2{,}3 \lg \frac{2\,l}{d}}{2\,\pi\,l} \cdot \left(1 + \frac{\lg \frac{l}{2\,t}}{\lg \frac{2\,l}{d}}\right)$$

2° lorsque l est beaucoup plus grand que d, et t beaucoup plus grand que $\frac{l}{4}$

$$R = \varrho \cdot \frac{2{,}3 \lg \frac{2\,l}{d}}{2\,\pi\,l} \cdot \left(1 + \frac{\frac{l}{4\,t}}{2{,}3^2 \cdot \lg^2 \frac{l}{d}}\right)$$

Ces mesures furent effectuées toutes les deux semaines environ. L'exactitude de la mesure a fait l'objet de recherches spéciales. Les erreurs ne pouvaient être réduites à volonté, ce qui provient en partie de la méthode utilisée et de la disposition des électrodes; elles peuvent atteindre jusqu'à 10%.

Les résultats des essais ont été reportés sur la fig. 2. Les résistances spécifiques des divers genres de terrains sont portées en ohms $\cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$; ce sont chaque fois la valeur minimum, la valeur maximum et la valeur moyenne, tirées d'environ 50 mesures effectuées sur les deux électrodes enfouies à une profondeur moyenne de 1 à 1,5 m. La résistance spécifique des terrains examinés va de 1550 à 97 000 ohms $\cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$. La résistance de passage à la terre obtenue pour une surface de l'électrode égale à 0,5 m² était donc de 6,5 ohms dans le cas le plus favorable, et de 390 ohms dans le cas le plus défavorable. Pour être complets, nous remarquerons que l'on n'a pas cherché à obtenir la plus faible résistance possible pour la surface de 0,5 m², en

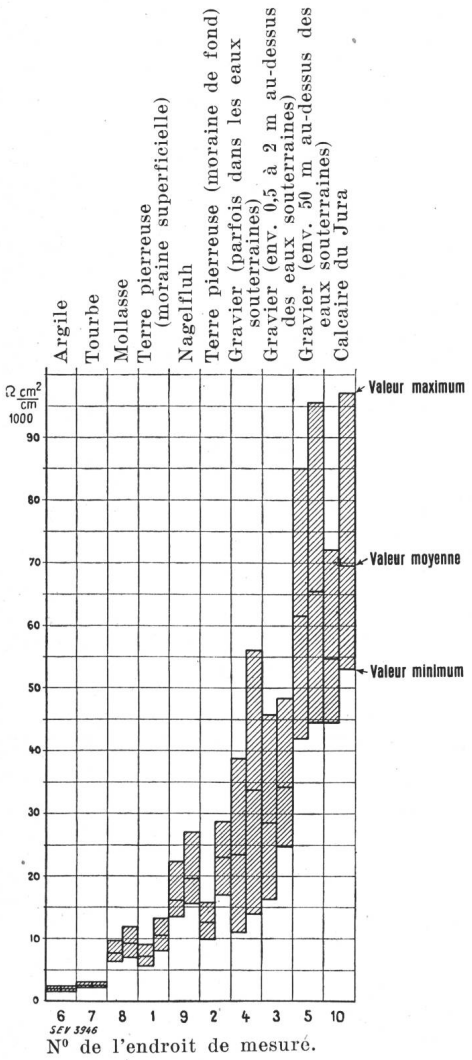

Fig. 2.
Résistances spécifiques de divers genres de terrains,
déterminées au cours de deux années à deux mises à la terre à une profondeur de 1 à 1,5 m au-dessous du sol.

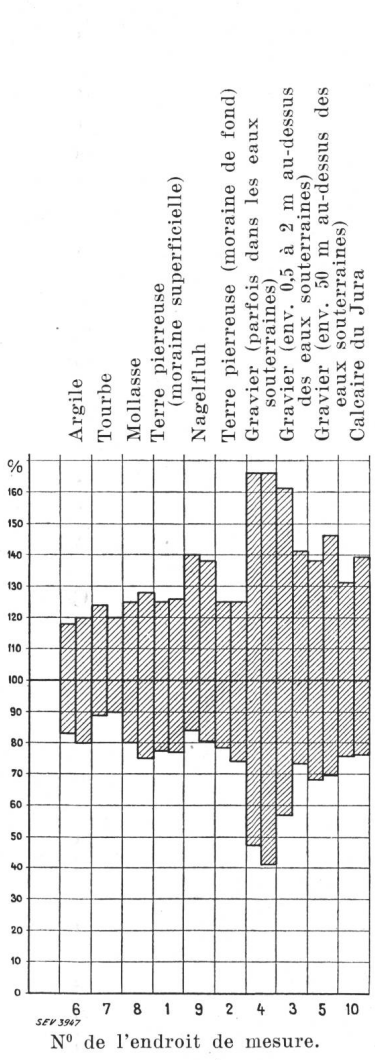

Fig. 3.
Variations de la résistance spécifique de divers genres de terrains sous l'effet des conditions atmosphériques,
déterminées à deux mises à la terre à une profondeur de 1 à 1,5 m au-dessous du sol.
Valeur moyenne tirée d'environ 50 mesures = 100 %.

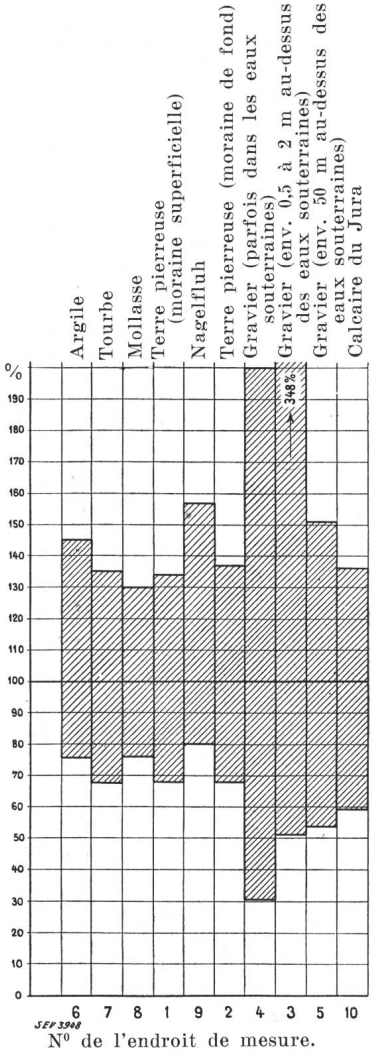

Fig. 4.
Variations des résistances de terre de divers genres de terrains sous l'effet des conditions atmosphériques,
déterminées à une profondeur de 0,5 à 0,7 m au-dessous du sol.
Valeur moyenne tirée d'environ 50 mesures = 100 %.

installant ces électrodes d'essai, mais plutôt à déranger le moins possible les conditions primitives du sol.

Les variations en pourcents au-dessus ou au-dessous de la valeur moyenne ont été reportées sur la fig. 3. Comme on le voit, les variations de la résistance spécifique sont les plus faibles dans le cas de la tourbe et les plus fortes dans celui du gravier. Le rapport entre la valeur maximum moins la valeur moyenne annuelle et la valeur moyenne annuelle moins la valeur minimum n'est pas identique pour tous les terrains examinés. Il s'ensuit que les variations des valeurs de la résistance ne présentent pas la même allure pour tous les genres de terrains.

Moins les électrodes sont enfouies profondément plus les variations de résistance deviennent naturellement grandes. Elles sont représentées sur la fig. 4 pour une profondeur de 0,5 à 0,7 m. Du fait que, dans la plupart des endroits de mesure, ces électrodes se trouvent en partie dans la couche d'humus, l'indication d'une résistance spécifique n'a aucune valeur dans ce cas. Les résistances obtenues avec 0,5 m^2 de surface d'électrode allaient de 8 ohms pour la tourbe à 626 ohms pour le gravier.

La fig. 2 demande encore quelques explications complémentaires. On remarquera la forte différence entre les résistances spécifiques moyennes des deux électrodes logées dans la moraine de fond. Cela provient du fait que, pour l'une des électrodes le sol était légèrement argileux, et pour l'autre légèrement sablonneux. Dans les terrains à moraines, ces inégalités se présentent fréquemment. Ce même phénomène se présente également pour les moraines superficielles, mais dans une moindre mesure.

Aux trois électrodes logées dans le gravier, à différentes hauteurs au-dessus de la nappe des eaux souterraines, on a cherché à déterminer l'effet de ces dernières sur la résistance. Les endroits de mesure 3 et 4 étaient distants d'environ 200 m. On peut donc admettre que le gravier était de même nature à ces deux endroits. Ainsi que l'indiquent les mesures, les valeurs moyennes de la résistance spécifique du gravier parfois noyé par les eaux souterraines (endroit 4) ne varient pas beaucoup par rapport à celles du gravier à 0,5—2 m au-dessus des eaux souterraines. Cette variation est en tous cas beaucoup plus faible que celle des valeurs de la résistance de passage des électrodes enfouies au même endroit. La valeur minimum observée quand une électrode plongeait entièrement dans les eaux souterraines est légèrement plus faible que celle de l'électrode au-dessus des eaux souterraines; par contre, la valeur maximum constatée pour une électrode complètement à sec est encore plus élevée que celle de ladite électrode. La pose d'une électrode dans les eaux souterraines n'a donc pas donné une sensible réduction de la résistance par rapport à celle d'une électrode placée juste au-dessus des eaux souterraines. Ce résultat s'explique aisément, si l'on admet que le terrain se trouvant peu au-dessus des eaux souterraines est toujours un peu humide par capillarité et parfois par un recouvrement de boues ou de gravier. Il est toutefois préférable d'enfouir une électrode à une profondeur telle qu'elle reste noyée sur toute sa longueur, même lorsque les eaux souterraines atteignent leur niveau le plus bas, car on évite ainsi les valeurs maxima provoquée par desséchement et par le gel.

La résistance spécifique pour le gravier à environ 50 m au-dessus de la nappe souterraine (endroit de mesure 5) est plus de 2 fois supérieure à celle des graviers dont nous venons de parler. Ce rapport se maintenant aux époques des fortes précipitations, on croit pouvoir en chercher la cause dans la composition même du gravier. Cette explication paraît être correcte, car les divers terrains graveleux ont des origines géologiques différentes. Les endroits de mesure 3 et 4 se trouvent dans les graviers provenant des glaciers de la Linth et de la Reuss, tandis que l'endroit de mesure 5 se trouve dans les graviers du glacier du Rhin. Il nous semble toutefois plus probable que la différence entre les résistances spécifiques provient de la distance au niveau des eaux souterraines. Dans les graviers situés bien au-dessus des eaux souterraines, les eaux de pluie s'enfoncent rapidement, de sorte que le terrain proche de la surface du sol retient moins d'humidité que celui qui est immédiatement au-dessus des eaux souterraines.

Quant aux électrodes enfouies dans la mollasse, le «nagelfluh» et le calcaire, nous remarquerons ce qui suit: Ces roches ont également été examinées, car une roche ne présente pas nécessairement une forte résistance spécifique et il est parfois inévitable de placer des électrodes dans la roche. Ainsi, dans l'Oberland zurichois, les roches de «nagelfluh» sont recouvertes en certains endroits d'une couche d'humus d'environ 20 cm seulement, qui n'est pas suffisante pour la pose d'une électrode devant tenir compte des tensions de contact et des fortes variations des valeurs de la résistance de passage au sol.

Contrairement à ce qui a eu lieu pour les autres mises à la terre, les tranchées pour les électrodes de ces trois endroits de mesure n'ont pu être creusées qu'en faible partie; pour le reste, on a dû avoir recours à des explosifs. La mollasse examinée, qui se désagrège peu à peu à l'air, est remarquable par sa faible résistance spécifique, ce qui est dû à sa teneur en argile. Contrairement au «nagelfluh» de l'époque glaciaire, le «nagelfluh» de l'étage de la mollasse est une roche fortement agglomérée que l'on utilise parfois comme le calcaire du Jura pour la construction, lorsque son grain est suffisamment fin. Pour relier intimement les électrodes placées dans les roches de «nagelfluh» et de calcaire, les électrodes ont été logées dans une couche d'humus de 5 à 10 cm, puis on a rempli les tranchées avec des débris de roche, ce qui ne modifie pas sensiblement la résistance, quant au parcours des lignes de courant. La résistance de la couche d'humus avait été calculée sur la base de mesures comparatives et on en a tenu compte dans la valeur totale mesurée. Les résultats obtenus sont intéressants, car on a pu

constater qu'il est aisé de réaliser une mise à la terre à résistance relativement faible dans les roches de nagelfluh de l'étage de la mollasse. Il n'en va pas de même pour le calcaire du Jura, ce qui s'explique en partie par la perméabilité du calcaire. En comparant les résistances spécifiques du nagelfluh et du calcaire, on doit considérer que les mesures n'ont pas été faites en même temps que les autres et que, du fait que les valeurs extrêmes de l'année 1929 manquent, les valeurs moyennes à considérer sont probablement de 5 à 10 % supérieures aux valeurs indiquées. Le rapport de la répartition du courant dans le nagelfluh et le gravier entre les parties grossières et les liants est d'importance secondaire. Il serait cependant très intéressant de déterminer ce rapport par des essais, et de procéder d'une manière générale à des recherches précises, pour tous les terrains entrant en ligne de compte, sur la conductibilité de ceux-ci suivant leur nature.

Les résultats de certaines mesures effectuées à l'aide de sondes dans des carrières de sable fournissent quelques indications sur ces rapports. Les valeurs indiquées correspondent approximativement à la valeur moyenne annuelle et s'entendent pour des matériaux en place:

	ϱ en ohms $\cdot \frac{cm^2}{cm}$
1° Sable quartzeux de la mollasse marine:	
a) avec calcaire et argile	9 000
b) pur environ	32 000
2° Sable de l'époque glaciaire (sable calcaire et quartzeux:	
a) avec argile environ	25 000
b) pur environ	150 000
3° Endroit de mesure *8*, à titre de comparaison:	
Grès de la mollasse d'eau douce supérieure (calcaire et sable) avec argile	9 300

Les valeurs élevées de ϱ sous 2° proviennent probablement de la pression naturellement faible subies par le matériau.

Contrairement à ce qui précède, les mesures dans les terrains argileux ont donné, pour l'argile de l'étage de la mollasse et l'argile de l'époque glaciaire, la même résistance spécifique ϱ = environ 2000 ohms $\cdot \frac{cm^2}{cm}$ comme valeur moyenne annuelle.

Pour permettre de déterminer approximativement l'effet de la température et des précipitations, les valeurs mesurées ont été reportées en pourcents de la valeur moyenne des années 1929 et 1930, et on a indiqué au-dessus la courbe des températures et la quantité des précipitations. Les fig. 5b et c indiquent ce rapport pour deux genres de terrains. La figure 5b montre l'allure normale des variations de la résistance, valable pour la majorité des terrains, et la fig. 5c l'allure pour les graviers, parfois noyés dans les eaux souterraines. Les lignes désignées par *a* se rapportent aux électrodes qui atteignent presque la surface du sol, tandis que les deux autres lignes désignées par *b* et *c* se rapportent aux électrodes plus profondément enfouies. Cette représentation est toutefois entachée d'une certaine erreur, par le fait que les températures et les précipitations sont celles de Zurich, alors que les endroits de mesure sont situés à 10 et 15 km de cette ville. On reconnaît cependant distinctement le rapport qui existe entre la variation de la résistance et les conditions atmosphériques. Des deux courbes de température qui se rapportent à 7 h 30 et à 13 h 30, on sait qu'on peut tirer des conclusions sur l'insolation. De petites différences indiquent un ciel couvert (brouillard en hiver), de fortes précipitations pour de faibles différences de température indiquent un temps de pluie ou de neige. De fortes précipitations pour de fortes différences de température indiquent un orage. On remarque distinctement que la résistance des tubes qui atteignent presque la surface du sol suit les variations atmosphériques plus rapidement que la résistance des électrodes enfouies plus profondément. Lorsque les conditions atmosphériques varient rapidement, la modification des valeurs de la résistance peut même se faire en sens contraire, ce qui tient probablement à la perméabilité et à la capacité d'absorption du terrain.

Les deux années 1929 et 1930 ont été très favorables aux mesures, car la première année a présenté une longue période de froid et de faibles précipitations, tandis que qu'au cours de la seconde les précipitations ont été extrêmement fortes. La période de froid en février 1929 se reconnaît à une forte augmentation de toutes les valeurs de la résistance. Sous l'effet des précipitations, la résistance s'abaisse jusqu'en juin, pour atteindre ensuite à nouveau un maximum au mois d'octobre par suite de la sécheresse; ce second maximum dépassait pour quelques électrodes celui de février. Le premier semestre 1930 n'offre rien de particulier. Les fortes précipitations du second semestre ont amené la résistance de toutes les électrodes à une valeur minimum.

Les mesures qui ont été poursuivies jusqu'ici (c'est-à-dire pendant 3½ années de plus) à l'endroit no. 1 n'ont pas présenté d'écarts sensibles avec les valeurs indiquées. Nous ajouterons que cet endroit de mesure, ayant une plus grande importance, a été mieux installé que les autres et permet de lire en tout temps les valeurs de la résistance sur un instrument à aiguille par la mesure du courant et de la tension.

III.

Pour simplifier le calcul d'une électrode en utilisant les résultats de mesures, on admet pour toutes les mises à la terre une allure identique des variations de la résistance. Le rapport des écarts de la valeur moyenne est alors toujours constant pour deux terrains quelconques; les écarts s'obtiennent en proportion. La supposition ci-dessus n'étant qu'approximative, ce mode de calcul reste toutefois entaché d'une certaine erreur, qui sera réduite au minimum, si l'on base le calcul sur la valeur moyenne annuelle.

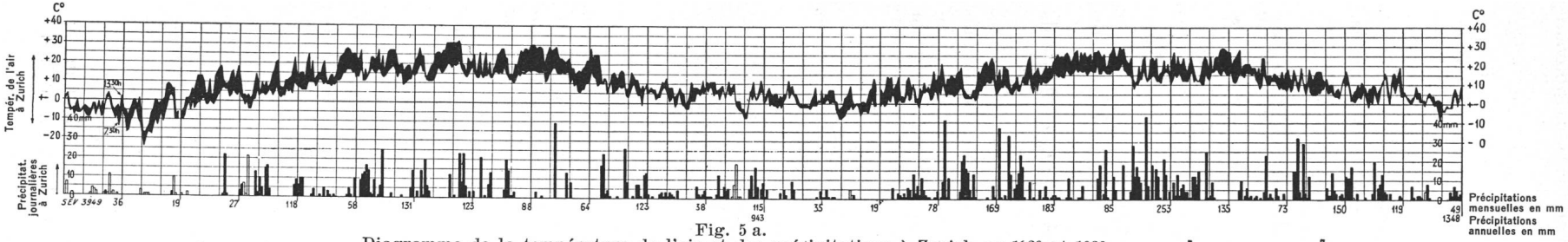

Fig. 5 a.
Diagramme de la température de l'air et des précipitations à Zurich en 1929 et 1930.

Pluie Neige

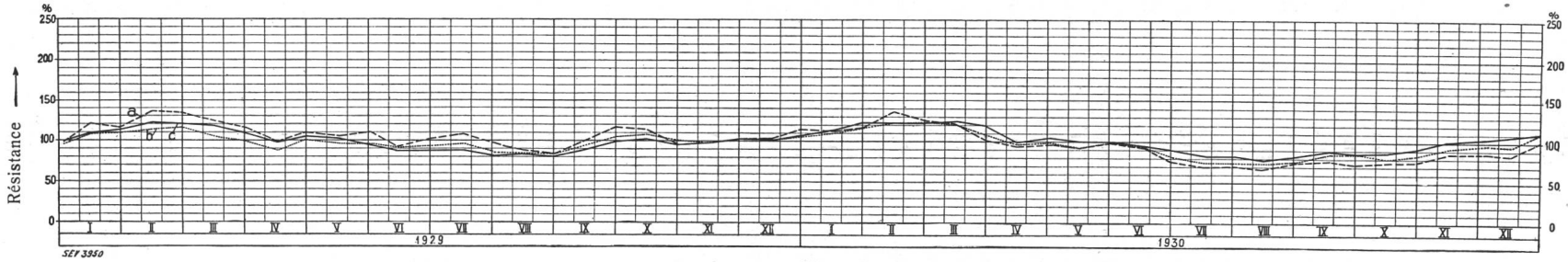

Fig. 5 b.
Variation de la résistance à l'endroit de mesure N° 2, Affoltern a. A. Nature du terrain: Terre pierreuse (moraine de fond).

Valeur moyenne de toutes les mesures 1929/30 = 100 %.

pour a (extrémité supérieure du tube 5 cm au-dessous du sol) 100 % = 57,5 Ω correspondant à une résistance spécifique de 12,6 · 10^3 Ω cm²/cm.
pour b (extrémité supérieure du tube 90 cm au-dessous du sol) 100 % = 93,6 Ω correspondant à une résistance spécifique de 23,1 · 10^3 Ω cm²/cm.
pour c (extrémité supérieure du tube 90 cm au-dessous du sol) 100 % = 51 Ω correspondant à une résistance spécifique de 12,6 · 10^3 Ω cm²/cm.

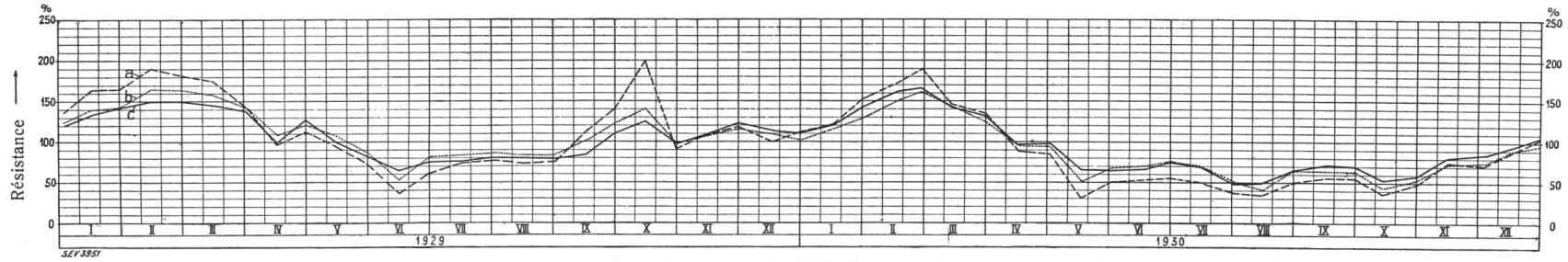

Fig. 5 c.
Variation de la résistance à l'endroit de mesure N° 4, Dietikon. Nature du terrain: Gravier noyé parfois dans les eaux souterraines.

Valeur moyenne de toutes les mesures 1929/30 = 100 %.

pour a (extrémité supérieure de tube 5 cm au-dessous du sol) 100 % = 170,2 Ω correspondant à une résistance spécifique de 37,4 · 10^3 Ω cm²/cm.
pour b (extrémité supérieure du tube 70 cm au-dessous du sol) 100 % = 138,3 Ω correspondant à une résistance spécifique de 33,7 · 10^3 Ω cm²/cm.
pour c (extrémité supérieure du tube 70 cm au-dessous du sol) 100 % = 95,5 Ω correspondant à une résistance spécifique de 23,3 · 10^3 Ω cm²/cm.

Fig. 5.
Variation de la résistance d'une mise à la terre avec tube de 0,5 m² de surface au cours des années 1929/30.

Exemple: On doit placer une électrode d'une résistance de passage à la terre de 20 ohms à une profondeur de 1 m dans un terrain argileux. A l'aide d'une sonde de 30 cm de longueur et de 15 mm de diamètre, on mesure à cette profondeur une résistance de 46 ohms, par exemple. De la formule 2, on tire pour cette électrode une résistance spécifique de $50 \cdot 46 = 2300$ ohms$\cdot \frac{cm^2}{cm}$. L'endroit de mesure permanent signale que la résistance de son électrode est actuellement de 10 % supérieure à la valeur moyenne annuelle, par exemple. La valeur maximum a été déterminée à 26 % au-dessus de la valeur moyenne annuelle. De la fig. 3, on tire la valeur maximum pour une terre argileuse, qui est de 20 % supérieure à la valeur moyenne annuelle. La valeur mesurée sera donc probablement de $\frac{10}{26} \cdot 20 = 8$ % supérieure à la valeur moyenne annuelle pour terrain argileux et l'on doit admettre une valeur maximum de $2300 \cdot \frac{100+20}{100+8} = 2550$ ohms$\cdot \frac{cm^2}{cm}$ comme base des calculs. Si la valeur indiquée par l'endroit de mesure permanent est inférieure à 100 %, on devra naturellement tabler sur les valeurs-limite inférieures. Les dimensions de l'électrode peuvent être choisies à volonté, pour autant que les prescriptions en vigueur, par exemple celles des art. 23 et 24 de l'ordonnance fédérale sur les installations à fort courant, soient satisfaites. La tendance à réaliser l'installation avec le moins de frais possible sera généralement prédominante. On obtient le plus rapidement un résultat en examinant quelles sont les valeurs de la résistance que l'on peut atteindre avec les matériaux disponibles, rubans, tubes, etc., de diverses longueurs; on établit ainsi un graphique de ces valeurs, sur lequel on peut trouver aisément la valeur cherchée.

Les mesures effectuées jusqu'ici sur un certain nombre d'électrodes calculées de cette manière n'ont présenté que des erreurs de 5 à 20 %, ce qui prouve que cette méthode peut s'utiliser avec succès. En prévoyant une augmentation de cet ordre de grandeur, on peut ainsi tenir compte de cette erreur dès le début des calculs, dans la majorité des cas. Les électrodes installées peuvent jouer en tout temps le rôle d'endroit de mesure, de sorte qu'il est possible d'améliorer et de compléter par les nouveaux résultats les tables déjà établies.

A vrai dire, il arrivera parfois que les calculs et les mesures ne concorderont pas. Ceci aura lieu surtout dans le cas où le terrain se compose de couches de matériaux différents présentant des conductibilités inégales, par exemple une couche bien conductrice sur un fond mauvais conducteur. Dans de pareils cas, les formules indiquées ne sont plus utilisables. Des différences se produiront également lorsque les mesures auront lieu dans un terrain qui présente des variations de la résistance tout à fait différentes de celles des terrains examinés. La cause peut provenir de la composition du terrain, de sa configuration, du niveau des eaux souterraines, etc. Les terrains examinés se trouvaient en majeure partie dans des lieux plans et bien dégagés. Les électrodes disposées sur des pentes raides et ensoleillées se comporteront certainement d'une façon différente. Certains résultats de mesure permettent de supposer que la végétation peut aussi influer sur les variations de la résistance. Les défauts de concordance permettront également dans ce cas d'obtenir de nouvelles indications pouvant servir de base aux calculs.

Quand les électrodes sont assez minces, la résistance du premier mètre constitue une part relativement grande de la résistance totale. On doit donc porter toute son attention à l'entourage immédiat de l'électrode et veiller surtout à ce qu'aucune grosse pierre ne vienne directement en contact avec l'électrode, lors du remplissage de la tranchée. Il est toujours recommandable de damer la terre et de la mouiller légèrement, sans quoi la valeur définitive de la résistance ne s'établirait qu'après une période assez longue.

A l'aide des valeurs indiquées sur la fig. 2 pour la résistance spécifique, on peut se rendre compte des moyens nécessités pour établir une mise à la terre présentant une résistance donnée dans tel ou tel genre de terrain. Admettons, par exemple, la valeur de 20 ohms exigée à l'art. 23, chiffre 2, de l'ordonnance sur les installations à fort courant. Les longs rubans minces donnant par unité de poids les résistances de passage à la terre les plus faibles, on choisira un ruban redressé dont les dimensions devront atteindre au moins 30×3 mm, conformément à l'art. 24, chiffre 4. Pour obtenir une résistance de 20 ohms dans les terrains examinés, la longueur nécessaire l du ruban sera:

Dans l'argile et la tourbe, quand

$$\varrho = 3 \cdot 10^3 \text{ ohms} \cdot \frac{cm^2}{cm} \quad l = 1{,}3 \text{ m}$$

Dans la mollasse et les terrains pierreux I $= 13 \cdot 10^3$ » $= 9$ m

Dans le «nagelfluh» et les terrains pierreux II $= 29 \cdot 10^3$ » $= 24$ m

Dans le gravier I $= 56 \cdot 10^3$ » $= 55$ m

Dans le gravier II et le calcaire $= 96 \cdot 10^3$ » $= 103$ m

Le montage de rubans de 55, à plus forte raison de 103 m, est peu économique et souvent irréalisable, à moins qu'il ne s'agisse d'installations d'importance considérable. Un ruban plus large, par exemple d'une largeur double, ou une profondeur d'enfouissement plus grande ne permettent qu'une très faible réduction de la longueur, comme le prouvent les calculs. Dans un pareil cas, ce calcul préalable évite des essais coûteux. Lorsqu'il s'agit de terres de protection, il est parfois possible d'obtenir un bon résultat par une disposition adéquate de l'électrode et de maintenir ainsi la chute de tension à une valeur suffisamment faible, malgré la résistance élevée. Si cela n'est pas réalisable, ou que la résistance de passage à la terre doive être encore plus faible (par exemple pour les terres de protection dans les installations à basse tension), une mise à la terre n'entre plus en ligne de compte comme moyen de protection dans des terrains présentant une résistance spécifique aussi élevée. On doit alors avoir recours à d'autres moyens.