**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens

**Herausgeber:** Association suisse des électriciens

**Band:** 52 (1961)

**Heft:** 9

**Artikel:** Considérations fondamentales à propos de la revision [i.e. révision] des prescriptions relatives à la mise à la terre d'installations à haute tension

**Autor:** Berger, K.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1059048

**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**

# BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

## Considérations fondamentales à propos de la revision des prescriptions relatives à la mise à la terre d'installations à haute tension

Par *K. Berger*, Zurich

621.316.99

*(Traduction)*

*Cet article est basé sur une conférence que l'auteur a donnée, en sa qualité d'ingénieur chargé des essais, lors de l'Assemblée des membres de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), le 1er décembre 1960. Il débute par la description de quelques phénomènes perturbateurs, qui sont à la base de la disposition et du dimensionnement des terres d'installations à haute tension. Les limites des courants alternatifs et des courants de choc encore non dangereux pour les personnes sont indiquées, en se basant sur des communications récentes, et comparées avec les tensions et courants de contact qui résultent de défauts d'isolement. En relation avec la revision en cours de l'Ordonnance sur les installations électriques à fort courant, quatre points sont mis en discussion pour la nouvelle teneur des dispositions essentielles concernant les mises à la terre. L'auteur propose principalement la création d'une seule et unique «terre pour l'installation à haute tension», au lieu des «terres de protection et de service» prévues jusqu'ici. Là où des circuits basse tension quittent la zone de l'installation à haute tension (réseau local, PTT), il faut une «terre pour circuits extérieurs à basse tension» séparée, appelée jusqu'ici «terre séparée». Enfin, l'auteur attire particulièrement l'attention sur le fait qu'en raison de la tension d'alimentation plus élevée qu'autrefois (16 kV, au lieu de 6 à 10 kV), les exigences posées à l'isolement des circuits extérieures à basse tension dans les postes de transformation locaux (postes de consommateurs) sont devenues plus sévères.*

*Der Aufsatz gibt den Inhalt eines Vortrages wieder, den der Autor als Versuchsleiter vor der Mitgliederversammlung der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) am 1. Dezember 1960 hielt. Im Referat werden zunächst einige Störungsvorgänge beschrieben, die sich für die Anordnung und Bemessung der Erdungen in Hochspannungsanlagen von praktischer Bedeutung erwiesen haben. Die Grenzen der für den Menschen noch ungefährlichen Wechselströme und Stoßströme werden auf Grund der neueren Literatur erwähnt und mit den Berührungsspannungen und -strömen bei Isolationsfehlern verglichen. Im Zusammenhang mit der heute in Revision befindlichen Verordnung für Starkstromanlagen werden vier Punkte für die Neufassung der grundsätzlichen Erdungsbestimmungen zur Diskussion gestellt. Im wesentlichen wird die Schaffung einer einheitlichen und einzigen «Hochspannungserdung» an Stelle der bisherigen «Schutz- und Betriebserdungen» vorgeschlagen. Wo Niederspannungskreise den Bereich der Hochspannungsanlage verlassen (Ortsnetz, PTT), wird hiefür eine getrennte «Niederspannungserdung» benötigt, die bisher den Namen «Sondererdung» trägt. Auf die infolge der gegenüber früher grösseren Speisespannung (16 kV statt 6...10 kV) gewachsenen Anforderungen an die Isolation des Niederspannungskreises in den Ortstransformatorstationen (Verbraucherstationen) wird besonders hingewiesen.*

La revision des Ordonnances sur les installations électriques à faible et à fort courant, actuellement en cours, a remis en vedette le problème des prescriptions relatives à la constitution des terres dans des installations à haute tension. Depuis la 3e édition de l'Ordonnance sur les installations électriques de 1933 et la 4e édition (installations électriques et expropriation) de 1948, les installations électriques se sont développées, en Suisse, à tel point que les exigences relatives aux mises à la terre sont devenues beaucoup plus sévères. Les expériences faites en pratique avec la mise à la terre directe du point neutre, ainsi que les considérations et les expériences relatives aux tensions de choc, exigent un remaniement fondamental du chapitre «Terres».

### *Le but de la mise à la terre est manifestement double*

1° La mise à la terre doit, avant tout, rendre sans danger le contact avec tous les conducteurs directement accessibles dans des installations à haute tension. Elle sert donc à la protection des êtres vivants contre des différences de tension entre les parties accessibles de l'installation à haute tension. Cette protection est nécessaire à l'instant où un défaut d'isolement quelconque provoque un passage de courant dans des conducteurs normalement sans courant, ou lorsque des courants de foudre parviennent dans des parties d'une installation normalement sans courant. Dans le premier cas, les courants de défaut proviennent des sources de courant de l'installation, tandis que dans le second cas ils proviennent tout d'abord de la foudre, puis également, dans la règle, des sources de courant de l'installation à haute tension.

Outre la protection d'êtres vivants contre les surtensions dans l'installation, il peut être nécessaire d'empêcher qu'un courant de défaut provoque dans l'installation d'autres claquages, étincelles et arcs, c'est-à-dire de limiter les différences de tension à des valeurs sans danger. Dans ce sens également, le problème de la mise à la terre est un problème de protection contre les surtensions.

La mise à la terre qui doit répondre à ce but est désignée par «*terre de protection*» dans les Ordonnances en vigueur (articles 13 et 14).

2° Dans certains cas, la mise à la terre doit conduire un courant dans le sol, ce qui est par exemple le cas de la mise à la terre d'un pôle dans des installations de traction, du point neutre dans des installations à très hautes tensions, d'une borne de l'enroulement haute tension de transformateurs de tension, des circuits à haute fréquence de la téléphonie à onde porteuse, des parafoudres, etc. Il s'agit parfois de courants de service permanents, comme pour les mises à la terre d'un pôle de chemins de fer et des transformateurs de tension, tandis que dans d'autres cas il s'agit de courants passagers, comme dans le point neutre de transformateurs de puissance ou dans les parafoudres.

L'Ordonnance désigne cela par «*terre de service*» (articles 15 et 16).

### *Comment le but des terres de protection et de service est-il atteint?*

La *protection de personnes*, c'est-à-dire l'empêchement de tensions de contact dangereuses, par exemple entre mains et pieds, ne peut manifestement être obtenue qu'en limitant à des valeurs non dangereuses la *différence de tension entre conducteurs pouvant être touchés*.

*Quelles sont ces valeurs non dangereuses?*

Selon l'Ordonnance sur les installations électriques à fort courant en vigueur, la tension de contact ne doit pas dépasser effectivement 50 V, à 50 Hz, tandis que les prescriptions allemandes fixent cette limite à 65 V. La résistance du corps humain étant de l'ordre de 1000 à 2000 Ω, les limites maximales admissibles sont celles, données par la fig. 1.

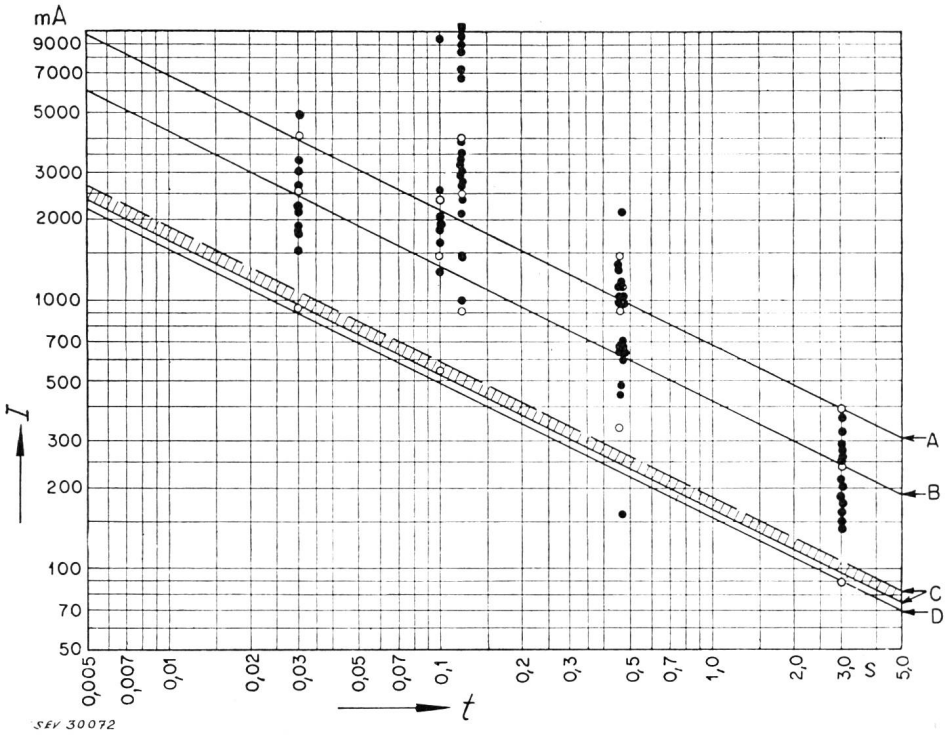


Fig. 1

**Courants alternatifs critiques $I$ (60 Hz) selon Dalziel, provoquant la fibrillation ventriculaire, en fonction de la durée de leur action $t$**

● mesurés à des moutons d'un poids de 57,4 kg

o calculés selon la formule $I^2T = 0{,}027$ [A²s]

Probabilité de fibrillation:
*A* 99,5 % pour moutons d'un poids de 57,4 kg; *B* 50 % pour moutons de 57,4 kg; *C* 0,5 % pour animaux et personnes d'un poids de 70 kg; *D* 0,5 % pour moutons de 57,4 kg

Pour le courant $I$ à travers le corps, durant 5 s:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50}{1000...2000} = 25...50 \text{ mA}$$

Pour la charge électrique, durant 5 s:

$Q = IT = (25...50) \cdot 5 = 125...250$ mCb

Pour l'énergie électrique, durant 5 s:

$A = I^2RT = UIT = 6{,}3...12{,}5$ Ws

Depuis la parution des dernières Ordonnances, *Ch. F. Dalziel*, Berkeley (Cal.), a publié les résultats d'investigations détaillées au sujet de la mise en danger d'êtres humains et d'animaux par le courant alternatif et par le courant de choc[1]). Selon ces renseignements, c'est la valeur $\int i^2 dt$, donc l'impulsion de courant au carré, qui est déterminante pour le danger, lorsqu'il s'agit de *courants alternatifs à la fréquence de 60 Hz (et de 50 Hz)* traversant le corps de la main au pied, durant 0,01 à 5 s. Cette impulsion atteint, selon *Dalziel*, pour la limite à laquelle une fibrillation ventriculaire se produit dans 0,5% de tous les cas:

$$\int i^2 dt \approx 0{,}027 \text{ [A}^2\text{s]}$$

La fig. 1 est une reproduction des courbes correspondantes, mesurées dans le cas de moutons. L'énergie en courant alternatif désignée comme maximale admissible pour les êtres humains est, sur la base de ces mesures:

$$A_K \approx 0{,}027\ R \text{ [Ws]}$$

$R$ étant la résistance, en Ω, du corps humain.

En ce qui concerne le *danger des courants de choc*, *Dalziel* a examiné une série d'accidents, dont les résultats sont indiqués à la fig. 2. D'après ces quelques données et dans le cas d'impulsions de brève durée, que l'on peut comparer plutôt à du courant continu très bref, qu'à du courant alternatif, quand il s'agit d'un choc pur, il en conclut que la limite de danger est au moins le double de l'impulsion de courant au carré, c'est-à-dire pour une énergie critique:

$$A_K = R \int i^2 dt \approx 0{,}054\ R \text{ [Ws]}\ .$$

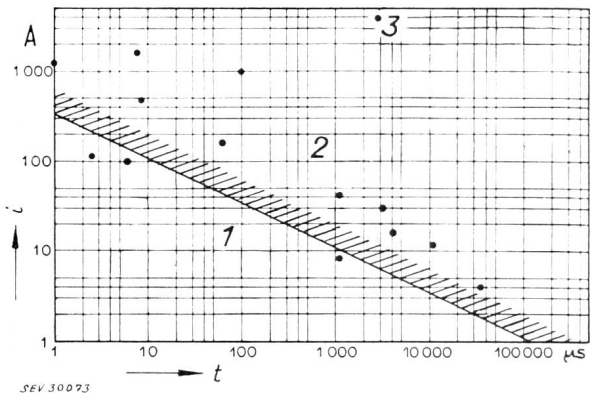


Fig. 2

**Limite des courants de choc $i$ dangereux pour les personnes, en fonction de leur durée $t$**

(selon Dalziel)

*1* Domaine non dangereux; *2* Domaine dangereux; *3* Accidents non mortels

Pour un courant de choc apériodique $\int i^2 dt = 0{,}5\ I^2 T$, si $I$ est la valeur de crête du courant de choc et $T$ sa constante de temps.

Dans ce cas, on peut écrire pour l'énergie critique:

$$R\ I^2\ T = 0{,}108\ R \text{ [Ws]}$$

[1]) *Dalziel, Ch. F.*, Univ. Berkeley, Paper 52-313, Vancouver B. V., Canada: Safety Committees, Sept. 1...4, 1953.

Le tableau I indique, selon les investigations de *Dalziel*, les courants et énergies à travers le corps humain, qui peuvent être actuellement encore considérés comme sans danger, pour les deux cas de courant alternatif à 50 Hz et de courant de choc de brève durée (50 μs).

*Courants et énergies maximaux admissibles à travers le corps humain*
Tableau I

| | | |
|---|---|---|
| Durée du courant à travers le corps, de la main au pied | 5 s | 50 μs [constante de temps $T$] |
| Résistance du corps $R$ | 1000 Ω | 500 Ω |
| Impulsion critique $\int i^2 dt$ | 0,027 $A^2s$ | 0,054 $A^2s$ resp. 0,108 $I^2T$ |
| Energie critique | 27 Ws | 27 Ws |
| Courant critique $I$ | 70 mA (fig. 1) | 60 A (fig. 2) |

Il s'ensuit que les courants dangereux au point de vue de la fibrillation ventriculaire varient, selon leur durée, entre de larges limites, c'est-à-dire entre environ 50 mA et 50 A. Les courants de choc de forte intensité provoquent généralement un choc très violent et, parfois, des paralysies passagères, mais non la dangereuse fibrillation ventriculaire.

*Après ces brèves considérations des limites dangereuses, nous examinerons quelles sont les tensions de contact pouvant se présenter dans une installation à haute tension.*

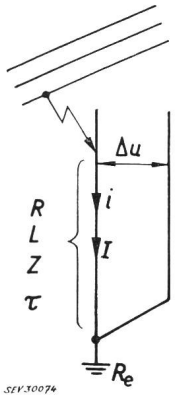


Fig. 3
**Différence de tension $\Delta u$ lors d'un passage défectueux du courant à la terre $R_e$**
$\Delta u = iR$ pour courant continu; $\Delta U = I(R + j\omega L)$ pour courant alternatif; $\Delta u_{st} = iZ_W$ (durant $2\tau$) pour courant de choc. $R$, $L$, $Z_W$ Résistance, inductivité et impédance caractéristique de la ligne de terre; $\tau$ Durée de propagation de l'onde; $R_e$ Résistance de la terre

Admettons qu'à un endroit quelconque de l'installation se produise un défaut d'isolement, de sorte qu'un courant circule dans la construction métallique ou dans les fers d'armure du bâtiment (fig. 3). Il peut s'agir d'un courant continu ou alternatif $I$ en régime stationnaire, ou d'un courant transitoire, par exemple d'un courant de choc $i$. Entre deux points des lignes de terre reliées à la terre, il s'établit une différence de tension, qui se calcule d'après la résistance ohmique, lorsqu'il s'agit d'un courant continu, ou d'après l'impédance $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ quand il s'agit d'un courant alternatif, ou encore d'après l'impédance caractéristique $Z_W$ de la ligne de terre et le courant de défaut, quand il s'agit de courants de choc dus à un claquage. Etant donné que $Z_W$ atteint quelques centaines d'ohms, la tension de choc de brève durée est nettement plus élevée que les valeurs en régime stationnaire en courant continu ou alternatif.

En ce qui concerne la valeur de l'onde de tension de choc qui apparaît, lors d'un claquage, dans la ligne de terre non bifurquée, elle atteint presque la moitié de la haute tension momentanée, lorsque les impédances caractéristiques de la haute tension et de la ligne de terre sont égales! Il s'agit donc d'une valeur très élevée, qui peut paraître dangereuse. La durée de cette tension est toutefois très brève, car elle ne demeure que pendant le double parcours $2\tau$ le long de la ligne de terre jusqu'à la «terre» et retour. Pour une ligne de terre de 10 m, cette durée est de $^1/_{30}$ μs = 33 ns, ce qui correspond approximativement à la durée de l'annulation de la tension dans l'arc à la pression atmosphérique, dans un champ homogène (éclateur à sphères). Dans un champ inhomogène, l'annulation prend plus de temps, de sorte que le front de la tension n'a pas du tout de place sur une longueur de conducteur de 10 m. La valeur de la tension de choc dépend donc grandement de la longueur de la ligne de terre non bifurquée. Dès la bifurcation, le courant de l'onde se répartit et la tension baisse. En pratique, cela signifie que de longues lignes de terre non bifurquées sont mauvaises, car il peut y apparaître des tensions élevées. Le *maillage des lignes de terre* présente un double avantage: La tension de choc est abaissée aussi bien en valeur, qu'en durée des hautes pointes. La fig. 4 montre l'effet d'un tel maillage de lignes de terre.

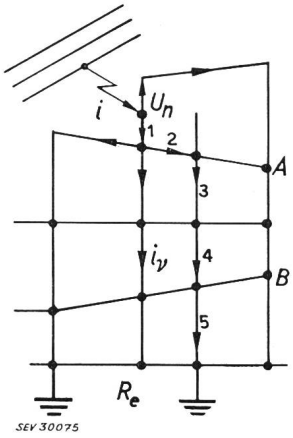


Fig. 4
**Parcours du courant dans des lignes de terre maillées**
$U_n$ Tension à l'endroit du défaut, par rapport à la terre $R_e$; $U_{AB}$ Différence de tension entre les points $A$ et $B$; $i_\nu$ Courant dans le tronçon $\nu$; $R_e$ Résistance de la terre; $R_\nu$, $L_\nu$ et $Z_\nu$ comme pour la fig. 3, mais pour le tronçon $\nu$; $\tau_\nu$ Durée de propagation par le tronçon $\nu$

$$U_n = \sum_1^n I_\nu (R_\nu + j\,\omega\, L_\nu);$$

$$\Delta U_{AB} = \sum_A^B I_\nu (R_\nu + j\,\omega\, L_\nu);$$

$$u_\nu = i_\nu\, Z_\nu \ldots (2\tau_\nu);$$

$$i_\nu \ll i$$

Du fait qu'un courant peut s'établir n'importe où, à la suite d'un défaut d'isolement du réseau à haute tension, la terre de protection doit présenter la forme d'un réseau bifurqué, aussi étendu que possible. La différence de tension ou la tension de contact entre les points $A$ et $B$ donne alors lieu à un choc beaucoup plus faible et le courant alternatif de suite est également moins intense, du fait qu'il est réparti.

Le cas limite est celui d'un nombre infini de lignes de terre, c'est-à-dire une cage en tôle, par laquelle le courant provenant d'un défaut d'isolement s'écoule, sans qu'il en résulte un champ magnétique à l'intérieur de la cage. Nous reviendrons sur le cas de ces «cages de Faraday». Une bonne protection n'est donc possible que par une étroite interconnexion de toutes les lignes de terre, ainsi que par une liaison à de nombreuses électrodes de terre et non pas seulement à une électrode. Pratiquement, il faut donc avoir recours à des terres circulaires ou à bandes, mais non à des électrodes en forme de plaques.

*Dans ce qui suit, nous nous occuperons des terres de service destinées à porter des courants permanents ou transitoires.*

Un courant permanent à la terre produit une chute de tension sur les lignes de terre de service. Lorsque, par exemple, le *point neutre d'un transformateur* est conduit à une terre de service séparée $BE$ (fig. 5), il y

circulera, en cas de mise à la terre accidentelle de la ligne à haute tension, un courant de court-circuit $I_{cc}$, de sorte que cette terre atteindra une tension $I_{cc}\ R_{BE}$. Il faut donc veiller à ce qu'aucun être vivant ne puisse toucher simultanément les deux terres et que la région de chute de tension de la terre de service ne s'étende pas dangereusement. Dans des installations françaises et italiennes, cela est réalisé en plaçant la terre de service du point neutre dans une fosse profonde, dans l'axe de laquelle l'amenée est isolée jusqu'au point neutre du transformateur.

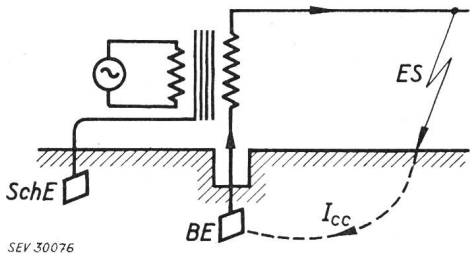


Fig. 5

**Terre de service *BE* (jusqu'à 1943) et terre de protection *SchE* séparées**

$I_{cc}$ Courant de court-circuit dû à la mise à la terre accidentelle *ES*

La deuxième possibilité consiste à relier cette terre du point neutre à la terre de protection maillée, c'est-à-dire à n'utiliser qu'une seule terre pour toute l'installation à haute tension. La fig. 6 montre que ce système évite le danger qui résulte de deux terres séparées. En cas de mise à la terre accidentelle de la ligne à haute tension, toute la terre se trouve sous tension, mais d'une valeur moins élevée qu'en cas de terres séparées.

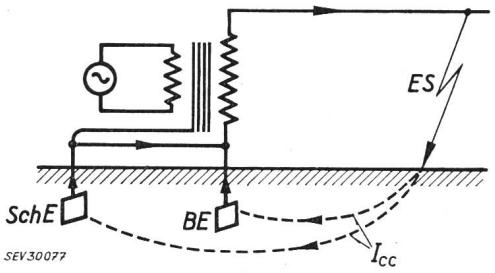


Fig. 6

**Terre de service *BE* et terre de protection *SchE* reliées**

$I_{cc}$ Courant de court-circuit dû à la mise à la terre accidentelle *ES*

Les conditions sont très différentes dans le cas d'un claquage se produisant dans l'installation elle-même. Si les terres sont reliées entre elles, le courant de court-circuit fourni par les alternateurs de l'installation ne circule pratiquement pas par la terre, mais par les parties métalliques. Dans le cas de terres séparées, il en résulterait des différences de tension maximales entre les deux terres, avec des tensions de pas maximales dans l'installation en plein air. Une autre complication résultant de la mise à la terre séparée du point neutre est que des transformateurs destinés à mesurer le courant du point neutre devraient être isolés pour la pleine tension de la terre de service, car leurs boîtiers doivent être reliés à la terre de protection. De même, les isolations échelonnées de transformateurs doivent tenir compte de la chute de tension à la terre de service séparée.

Si l'on considère non pas la mise à la terre du point neutre, mais celle de *parafoudres*, on peut constater que, dès 1943 déjà, on avait admis la nécessité de relier les bornes de terre par le chemin le plus court avec le réseau de terre de protection. C'est la seule manière de pouvoir utiliser complètement l'effet de protection du parafoudre. Celui-ci a donc obligé d'abandonner le principe de la séparation des terres de service et des terres de protection, car il appartient aussi bien à l'une qu'à l'autre.

De même, dans le cas des *transformateurs de tension*, il est sans importance de conduire à la terre de protection les faibles courants de l'enroulement haute tension de quelques mA; rien ne justifie de prévoir une terre de service séparée. Il en est de même pour la mise à la terre de *sources à haute fréquence* de la téléphonie à onde porteuse.

Les expériences d'exploitation de ces dernières décennies, ainsi que les considérations théoriques, montrent qu'il convient, après avoir comparé tous les avantages et tous les inconvénients, de n'utiliser qu'*une seule terre* pour l'installation à haute tension et de ne pas la séparer en terre de protection et terre de service. Tous les problèmes d'isolement deviennent ainsi plus simples et plus clairs, sans compter qu'une séparation de terres est, en pratique, souvent très difficile à réaliser, de sorte qu'une telle séparation n'existe généralement que sur le papier, mais pas en fait.

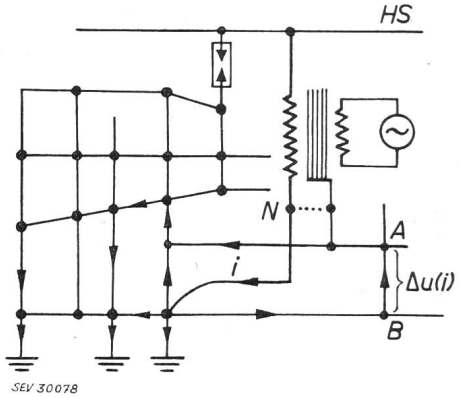


Fig. 7

**Etablissement de la tension perturbatrice $\Delta u(i)$ entre les points *A* et *B*, par suite de la mise à la terre de service du point neutre *N* du transformateur**

*HS* Terre de l'installation à haute tension; *i* Courant du point neutre *N*

Nous devons toutefois attirer l'attention sur un inconvéniant essentiel des terres reliées, qui se présente dans le cas d'un *courant de terre permanent*. La fig. 7 montre qu'il existe alors entre deux points quelconques *A* et *B* une différence de tension permanente, qui n'est pas dangereuse, mais risque de troubler les circuits à basse tension. Lorsque, par exemple, les circuits secondaires de transformateurs de tension et de courant sont mis à la terre au transformateur et aussi aux appareils de mesure ou aux relais, la différence de potentiel $\Delta U$ des courants de terre permanents peut troubler la mesure de la tension et du courant. Il en est de même lorsque des amplificateurs sont mis à la terre à différents endroits du réseau de terre. La différence de tension $\Delta U$ peut alors donner lieu à un ronflement. En conséquence, les circuits à basse tension sensibles ne doivent être mis à la terre qu'en un *seul* point. Cette

règle s'applique également aux réseaux à basse tension, dont le conducteur neutre conduit du courant. Il est donc avantageux d'introduire le courant de terre permanent dans le réseau de terre maillé, là où il ne produit que la plus faible tension perturbatrice. Ce point se trouve généralement à proximité des terres, de sorte que la ligne de terre de service doit être isolée jusqu'à cet endroit, au cas où des ronflements risqueraient de se produire.

Alors qu'il semble donc être préférable de ne parler que d'une «*terre pour l'installation à haute tension*» unique, au lieu de «terre de protection» et de «terre de service», il peut être nécessaire dans certains cas de faire une distinction entre «*lignes de terre de protection*» et «*lignes de terre de service*». Même lorsque plusieurs systèmes à haute tension différents existent dans une installation, il est préférable de ne disposer que d'une seule terre pour toute l'installation à haute tension. Il s'agit toujours, en effet, de la protection des personnes contre des tensions de contact, ce qui est obtenu le plus sûrement de cette façon. Dans le cas spécial d'installations à haute tension comportant des systèmes à 50 et à 16⅔ Hz, on peut faire une distinction entre installations avec branchement ferroviaire dans l'installation elle-même et celles qui n'alimentent que des voies très éloignées. Dans le premier cas, le raccordement des voies à la terre de l'installation à haute tension est indispensable. Dans le second cas, il faut nécessairement prévoir une ligne de terre d'un pôle à la voie éloignée, tandis qu'une connection supplémentaire à la terre de l'usine génératrice devra être envisagée selon le cas.

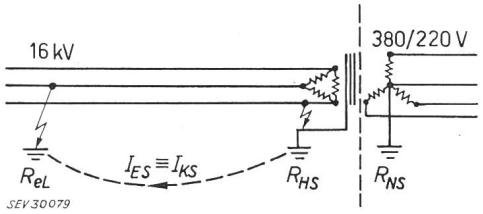


Fig. 8

**Tension sollicitant l'installation à basse tension d'un poste de transformation, lors d'une double mise à la terre accidentelle dans l'installation à 16 kV**

$R_{eL}$ Résistance de terre, lors d'une mise à la terre accidentelle de la ligne; $R_{HS}$ Résistance de terre, lors d'une mise à la terre accidentelle dans le poste; $R_{NS}$ Résistance de la terre separée de l'installation à basse tension; $I_{ES} = I_{KS}$ Courant de la double mise à la terre accidentelle; $U_{eL}$ Tension à la terre de la ligne; $U_{HS}$ Tension à la terre de l'installation à haute tension; $\Delta U_L$ Chute de tension de la ligne entre les deux endroits de mise à la terre

$U_{eL} + U_{HS} = 16 \text{ kV} - \Delta U_L \qquad U_{HS} \approx 10 \text{ kV}$

*Après nous être occupés des grandes installations à haute tension en plein air et dans des bâtiments, nous considérerons maintenant le cas du poste de transformation pour tension d'utilisation.*

L'Ordonnance en vigueur prévoit la protection des consommateurs d'énergie à basse tension contre des surtensions du réseau à haute tension, en isolant le circuit basse tension pour une tension d'essai d'au moins 4 kV, par rapport à la terre de l'installation à haute tension. Cette réglementation s'applique aux consommateurs situés hors du complexe à haute tension. La tension de 4 kV est justifiée par le fait que la mise à terre de l'installation à haute tension peut atteindre une tension proche de la tension de service, en cas de double mise à la terre accidentelle du réseau à haute tension, pour autant que l'une de ces mises à la terre se produise dans le poste de transformation. La tension de la terre est d'autant plus élevée que la résistance de terre du poste dépasse celle de l'endroit de l'autre mise à la terre accidentelle. La fig. 8 montre le cas du réseau à 16 kV, actuellement le plus fréquent.

Dans un réseau puissant, la tension d'alimentation composée se répartit entre les deux résistances de terre et dans le tronçon de ligne intermédiaire. Pour un poste de montagne, la résistance de terre $R_{HS}$ du poste peut être nettement plus grande que la résistance de terre $R_{eL}$ du deuxième endroit de défaut. Lorsque la distance entre ces deux endroits est grande, il faut en outre tenir compte de la réactance de la ligne, qui est d'au moins 0,5 Ω/km. En général, il suffit donc d'isoler le réseau à basse tension pour une tension d'essai d'environ 10 kV, par rapport à la terre de l'installation à haute tension. Cette augmentation correspond à peu près à celle des tensions de distribution, qui étaient autrefois de 6 à 8 kV et ne sont actuellement plus guère inférieures à 16 kV. Nous ferons toutefois remarquer que la tension d'essai de 10 kV n'offre qu'une assurance limitée contre le passage de la haute tension dans les circuits à basse tension, à savoir uniquement dans le cas d'un défaut d'isolement en haute tension sans surtension. Par contre, dès que les surtensions provoquent un contournement de l'isolation haute tension ou le fonctionnement des parafoudres haute tension, un claquage entre la terre de l'installation à haute tension et un circuit basse tension dépend de la chute de tension du courant de choc à la terre de l'installation à haute tension. Si la résistance de cette terre est de 10 Ω, un courant de choc de 1500 A donne lieu à une tension de choc de 15 kV, ce qui correspond à peu près à une tension d'essai de 10 kV en alternatif. Pour des courants de choc plus intenses dans la mise à terre d'une résistance de 10 Ω, l'installation à basse tension n'est plus épargnée.

Cette exigence d'une tension d'essai de 10 kV n'affecte guère l'isolement intérieur des transformateurs de consommateurs, car les isolements dans l'huile supportent aisément cette sollicitation. Par contre, tout l'isolement dans l'air entre l'installation basse tension et la terre pour haute tension doit être prévu pour cette tension d'essai, ce qui exige déjà des distances de cheminement de quelques cm et rend la séparation plus visible. Il y a lieu de s'attendre à ce que la méthode de montage de l'installation à basse tension sur plaques isolantes dans les stations de transformation devienne de plus en plus courante.

Dans l'Ordonnance en vigueur, la terre des circuits basse tension est désignée par «terre séparée», afin d'exprimer sa séparation de la terre de l'installation à haute tension. Par opposition à la terre de l'installation à haute tension, on pourrait aussi la désigner par «terre basse tension».

*Les entrées par câbles dans les postes prenant de plus en plus d'importance, nous considérerons dans ce qui suit quelques problèmes relatifs à la mise à la terre de ces câbles, qui peuvent être à haute ou à basse tension.* Ces problèmes sont compliqués, du fait de la corrosion électrolytique des gaines des câbles, soit par la formation d'éléments galvaniques, soit par la présence de courants continus vagabonds de chemins de fer ou de tramways. Il en résulte des avaries, qui n'apparaissent normalement qu'après de nombreuses années de service, aussi recouvre-t-on maintenant souvent les gaines métalliques des câbles avec une enveloppe de chlorure de polyvinyle ou de polyéthylène de 2 à 3 mm d'épaisseur.

Malheureusement, cette protection contre la corrosion s'est faite jusqu'ici aux dépens de l'utilisation des gaines métalliques pour la mise à la terre, de sorte que des tensions provenant de l'installation sont transmises à des distances plus considérables que lorsque les gaines métalliques demeurent nues. Dans d'autres cas, il s'agit d'empêcher la présence de courants secondaires permanents dans les gaines de plomb de câbles à haute tension à un seul conducteur. Les problèmes suivants se limitent à quelques exemples caractéristiques.

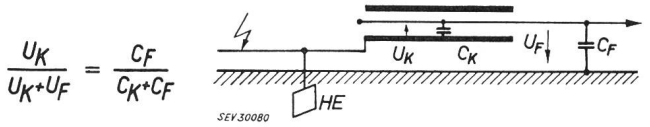


Fig. 9

**Tension en régime stationnaire d'un conducteur libre de câble suivi par un conducteur de ligne aérienne**

*HE* Terre de l'installation à haute tension; $C_K$ Capacité du conducteur du câble; $C_F$ Capacité du conducteur de la ligne aérienne; $U_K$ Tension du conducteur du câble, par rapport à la gaine; $U_F$ Tension du conducteur de la ligne aérienne, par rapport à la terre

$$\frac{U_K}{U_K + U_F} = \frac{C_F}{C_K + C_F}$$

1. *Quelles valeurs les tensions des conducteurs d'un câble atteignent-elles, lorsque la gaine métallique du câble est reliée à la terre pour haute tension?*

La fig. 9 montre l'*état stationnaire*, pour lequel les conducteurs dans le câble sont fixés uniquement par leurs capacités à la gaine métallique du câble puis, dans la ligne aérienne, à la terre. La tension de mise à la terre de la gaine du câble est répartie en conséquence.

On a:

$$U_F = U_e \frac{C_K}{C_F + C_K}$$

où

$U_e$ est la tension de mise à la terre de la gaine du câble,
$U_F$ la tension de la ligne aérienne, par rapport à la terre,
$C_K$ la capacité du câble et
$C_F$ la capacité de la ligne aérienne.

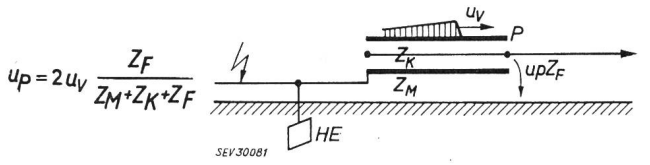


Fig. 10

**Passage d'une onde entre le câble et la ligne aérienne, par suite de l'élévation subite de la tension de la terre de l'installation à haute tension *HE***

*P* Passage du câble à la ligne aérienne; $Z_K$ Impédance caractéristique du câble (conducteur—gaine); $Z_M$ Impédance caractéristique de la gaine (gaine—terre); $Z_F$ Impédance caractéristique de la ligne aérienne; $u_V$ Tension de l'onde progressant dans le câble; $u_P$ Tension au point *P*

$$u_P = 2u_V \frac{Z_F}{Z_M + Z_K + Z_F}$$

Pour une ligne aérienne longue ou étendue, la tension de mise à la terre se trouve pratiquement à l'isolation du câble; elle est à l'isolation de la ligne, lorsque celle-ci est courte.

La fig. 10 représente la *pénétration dans le câble d'une onde à front raide* provenant de la terre de l'installation. Il est facile de calculer la tension de la ligne aérienne au point de transition du câble à la ligne:

$$u_P = 2\, u_V \frac{Z_F}{Z_F + Z_K + Z_M}$$

où

$u_V$ est la valeur de l'onde à front raide,
$Z_F$ l'impédance caractéristique de la ligne aérienne ($\approx 500\ \Omega$),
$Z_K$ l'impédance caractéristique du câble (30...50 Ω) et
$Z_M$ l'impédance caractéristique de la gaine du câble, par rapport à la terre ($\approx 400\ \Omega$).

En ce qui concerne l'onde, la ligne aérienne est donc pratiquement soumise à la pleine tension de terre.

2. *A quel point une gaine de câble nue de longueur quelconque contribue-t-elle à l'amélioration de la résistance de terre d'une installation?*

La fig. 11 montre, en principe, la variation du courant circulant le long d'une gaine de câble. Pour un câble très long ($l \to \infty$), cette variation peut être re-

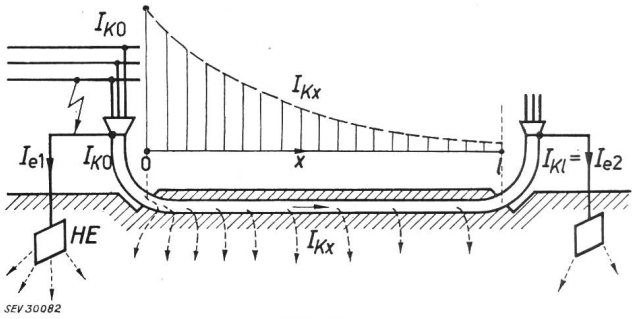


Fig. 11

**Variations du courant et de la tension de la gaine nue reliée à la terre de l'installation à haute tension *HE* dans le sol**

$I_{e1}$ Courant dans la terre de l'installation à haute tension *HE*; $I_{K0}$ Courant dans la gaine du câble, au début $x = 0$; $I_{Kx}$ Courant dans la gaine du câble, à l'endroit $x$; $I_{Kl}$ Courant dans la gaine du câble, à la fin $x = l$

présentée comme fonction exponentielle $e^{-\beta x}$. La tension de la gaine du câble par rapport à la terre varie exactement de la même façon. $X = 1/\beta$ représente le parcours sur lequel le courant diminue à $1/e = 37\%$. D'après les équations générales pour les lignes, on obtient la valeur de $\beta$. Cette valeur est très simple, si l'on admet que

a) la résistance longitudinale de la gaine du câble est faible, par rapport à la réactance $\omega L$ de la gaine à la fréquence de service,

b) les courants capacitifs sont négligeables par rapport aux courants ohmiques.

On a alors

$$X = \frac{1}{\beta} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{R_e'}{\omega L'}}\ \text{(km)}$$

où

$R_e'$ est la résistance de fuite de la gaine, pour 1 km (Ω · km) et
$\omega L'$ la réactance de la gaine par km (Ω/km).

La résistance de fuite d'une barre de section circulaire de longueur $l$ et de diamètre $d$ se calcule d'après l'équation:

$$R_e = \frac{\varrho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{l}{d/2}$$

Pour $\varrho = 100\ \Omega\text{m}$ (plaine), $d = 4$ cm, $l = 1000$ m, on a:

$$R_e' = \frac{100}{2000\,\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{1000}{0{,}02} \approx 0{,}17\ \Omega\ \text{km}$$

de sorte que

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{0{,}17 / 0{,}5} = 0{,}825\ \text{km}$$

Pour $\varrho = 10000\ \Omega$m (roche primitive), $d = 4$ cm et $l = 1000$ m, on a:

$$R_e' = \frac{10^4}{2000\,\pi} \cdot \ln \frac{1000}{0{,}02} \approx 17\,\Omega\,\text{km}$$

et

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{17\,/\,0{,}5} = 8{,}25\ \text{km}$$

On voit donc qu'une gaine de câble nue, une voie de galerie souterraine ou une conduite forcée peuvent améliorer considérablement la terre d'une installation, lorsque leur résistance longitudinale est faible par rapport à leur réactance. En plaine, c'est surtout le premier km du câble qui est utile; en montagne, les premiers 10 km. Il est donc superflu de vouloir maintenir la résistance longitudinale de la gaine d'un câble, d'une voie ou d'un

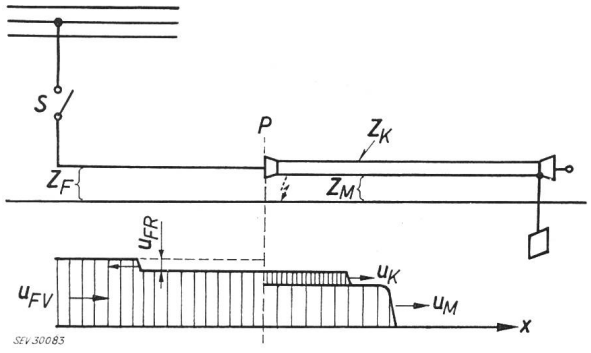


Fig. 12

**Passage d'une onde de tension entre la ligne aérienne $F$ et un câble non mis à la terre à l'endroit de passage $P$**

$Z_F$ Impédance caractéristique de la ligne aérienne; $Z_K$ Impédance caractéristique du câble (conducteur—gaine); $Z_M$ Impédance caractéristique de la gaine du câble, par rapport à la terre; $u_{FV}$ Onde progressant dans la ligne aérienne; $u_K$ Onde progressant dans le câble; $u_M$ Onde progressant de la gaine du câble à la terre

ruban de terre à une valeur très inférieure à sa réactance $\omega L$.

3. *Que se passe-t-il lors de la pénétration d'une onde à front raide dans un câble dont la gaine n'est mise à la terre qu'à une extrémité éloignée?*

Supposons qu'il s'agisse, par exemple, d'un câble à un conducteur pour 220 kV, faisant partie d'une ligne triphasée. Ce cas est la règle dans les usines souterraines dont les lignes partent d'un poste extérieur. On tâchera de mettre les deux extrémités d'un tel câble à la terre de l'installation à haute tension. Dans la boucle entre deux de ces câbles existe alors un champ magnétique, qui varie avec la fréquence de service et induit ainsi un courant dans les gaines de plomb. Ces gaines chauffées additionnellement diminuent la charge admissible des câbles si la conductivité de la gaine n'est pas améliorée par un enrobage de cuivre ou de bronze. En pratique, on évite cette difficulté en ne mettant qu'une extrémité de ces câbles à la terre, à savoir aux transformateurs, avec lesquels la boîte d'extrémité est généralement combinée. On obtient la disposition que représente la fig. 12.

Une onde à front raide provenant de la ligne aérienne $F$ pénètre dans le câble lors de la fermeture du disjoncteur $S$. Le début $P$ de la gaine n'étant pas mis à la terre, le courant dans la gaine doit y être nul. Cela n'est possible que parce que la gaine est mise sous tension, de sorte que le courant de pénétration de l'onde dans la gaine est égal au courant de retour de l'onde à l'intérieur du câble. De ce fait, la tension au point de transition $P$ est répartie conformément aux impédances caractéristiques du câble et de la gaine par rapport à la terre.

La tension en $P$ est donnée par l'équation:

$$U_P = 2\,U_V \cdot \frac{Z_K + Z_M}{Z_K + Z_M + Z_F}$$

où

$U_V$ est la valeur de l'onde dans la ligne aérienne,
$Z_F$ l'impédance caractéristique de la ligne aérienne,
$Z_R$ l'impédance caractéristique du câble et
$Z_M$ l'impédance caractéristique de la gaine du câble, par rapport à la terre.

$Z_M$ n'étant que légèrement inférieure à $Z_F$, la gaine du câble atteindra approximativement la pleine tension de l'onde incidente.

Comme l'expérience le prouve, l'apparition d'ondes à front raide, dues par exemple à des phénomènes de couplage, provoque des claquages entre la gaine nue du câble et la terre. Ces claquages peuvent être empêchés par des parafoudres pour basse tension. Lorsqu'il existe des transformateurs de courant à l'extrémité du câble non mise à la terre, la ligne de terre de ces parafoudres doit traverser ces transformateurs de courant, afin qu'en cas de défaillance du parafoudre le courant dans le conducteur du câble soit néanmoins mesuré correctement.

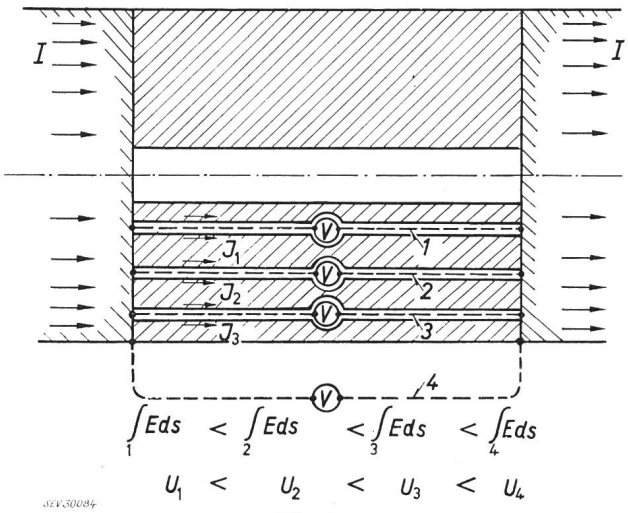


Fig. 13

**Tension $U$ à différentes distances de l'axe dans une gaine de câble épaisse, parcourue par un courant alternatif $I$ à haute fréquence**

$V$ Voltmètre; *1, 2, 3* Petit, moyen et grand rayons; $J$ Densité de courant; $E$ Gradient de tension $= \varrho J$

*Pour terminer, nous considérerons l'effet de gaines de câbles nues, épaisses ou avec armure en feuillard, reliées au moins par l'une des extrémités à la terre de l'installation à haute tension.*

Il s'agit notamment d'un long câble pour courant faible, dont la gaine métallique est reliée à la terre de l'installation à haute tension et constitue une terre supplémentaire de l'installation (fig. 11).

Quelle est la valeur de la tension à l'intérieur de ce câble, c'est-à-dire entre un conducteur et la gaine, lorsque ce conducteur est relié à la gaine à son autre extrémité? En technique des télécommunications, cette tension est appelée *tension longitudinale*.

Pour répondre à cette question, on peut raisonner de deux manières, qui conduisent chacune à la même réponse:

On peut partir du fait qu'il se produit un effet pelliculaire dans les conducteurs épais, qui est d'autant plus marqué que la fréquence du courant alternatif est

plus élevée et que la résistivité de la gaine est plus faible. La fig. 13 représente, sous une forme exagérée, une gaine de câble. Si l'on injecte dans cette gaine épaisse un courant alternatif, ce courant se répartit inégalement dans la section. A la surface extérieure, la densité du courant $J_3$ est la plus forte, tandis qu'à la surface intérieure de la gaine, la densité $J_1$ est la plus faible. Si l'on perçait trois trous très fins le long de la gaine et y mesurait, avec des voltmètres à forte résistance ohmique, la tension entre les deux surfaces extrêmes, le voltmètre le plus intérieur indiquerait la tension la plus faible

$$U_1 = \int E_1 \, ds = \varrho \int J_1 \, ds$$

tandis que le voltmètre le plus extérieur indiquerait la tension la plus élevée $U_3 = \int E_3 \, ds = \varrho \int J_3 \, ds$, $E$ étant le gradient de potentiel et $\varrho$ la résistivité du matériau de la gaine.

La différence entre $J_1$ et $J_3$ dépend de la fréquence $f$ du courant alternatif et de la résistivité $\varrho$. Dans une plaque plane, la densité de courant $J$ diminue exponentiellement vers l'intérieur, de sorte que l'on peut définir une «profondeur de pénétration», à laquelle la densité diminue, par exemple, à la fraction de $1/e = 37\%$ de la valeur superficielle. Pour des conducteurs non magnétiques, cette profondeur est

$$X_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \varrho}{f}}$$

Le tableau II donne quelques valeurs numériques pour le cuivre et le plomb, ainsi que pour la terre en plaine.

*Profondeur de pénétration $X_e$ du courant dans quelques conducteurs non magnétiques*

Tableau II

| $f =$ | 50 | $10^3$ | $10^6$ | Hz |
|---|---|---|---|---|
| Cuivre $\left(\varrho = \frac{10^{-6}}{57}\right)$ | 9,4 | 2,1 | 0,067 | mm |
| Plomb ($\varrho = 0{,}21 \cdot 10^{-6}$) | 34 | 7,2 | 0,23 | mm |
| Terre ($\varrho = 100\ \Omega$m) | 700 | 160 | 5 | m |

Ce tableau montre que l'effet pelliculaire dans les gaines de cuivre ou de plomb ne joue pas encore un rôle pratique à 50 Hz. Il en est tout autrement dans le cas de phénomènes transitoires rapides, notamment ceux de choc. A une fréquence de 1 MHz, $J_1$ devient négligeable par rapport à $J_3$, même dans une gaine de plomb. Le voltmètre le plus intérieur indique alors $U_1 \approx 0$, tandis que $U_3$ est beaucoup plus élevée que

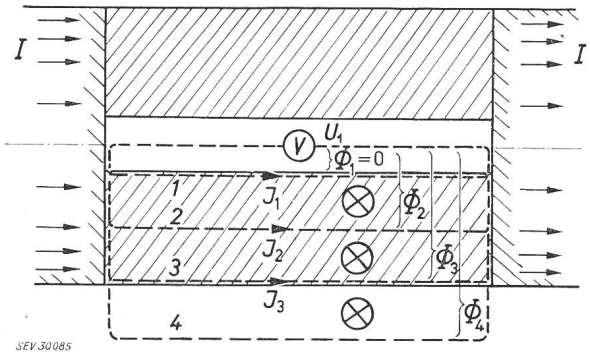


Fig. 14

**Tensions de boucle au voltmètre $V$ pour différentees boucles 1, 2, 3 et 4**

$J$ Densité de courant; $E$ Gradient de tension $= \varrho J$; $\Phi$ Flux

Le voltmètre $V$ mesure la tension ohmique à la surface intérieure de la gaine (tension longitudinale du câble)

dans le cas d'un courant continu uniformément réparti dans la section de la gaine. Par contre, une fréquence de 1 kHz donne encore lieu à une pénétration de la gaine de plomb.

Au lieu d'admettre un effet pelliculaire, on peut partir directement de la loi de l'induction, pour expliquer ces effets, en raisonnant comme suit: Selon la fig. 14, un seul voltmètre $V$ est introduit dans le câble. La question qui se pose est de savoir quelle est la tension $U_1$ qui est y mesurée. Si l'on forme tout d'abord la tension de boucle par la pellicule intérieure de la gaine du câble, il va de soi que l'on n'entoure ainsi aucun flux magnétique[2]). La tension indiquée par le voltmètre est donc exactement égale à la chute de tension ohmique à cette pellicule. Si l'on forme une deuxième boucle par une parallèle quelconque à l'axe du câble, une partie du flux magnétique se trouvera déjà dans la gaine. La tension $U_1$ mesurée par le voltmètre correspond alors à la chute de tension le long de cette parallèle quelconque, moins la tension induite par le flux magnétique dans cette boucle. On a:

$$U_1 = U_2 - \frac{d\Phi_2}{dt} = U_3 - \frac{d\Phi_3}{dt} = \ldots$$

$$= \int E_2 \, ds - \frac{d\Phi_2}{dt} = \int E_3 \, ds - \frac{d\Phi_3}{dt} \ldots$$

Plus la quantité de flux embrassé est grande, plus la tension ohmique $\int E ds = \varrho \int J ds$ doit augmenter. Il s'ensuit qu'un effet pelliculaire doit se produire.

En complément d'un article précédent sur l'efficacité de gaines de câbles pour la protection de l'intérieur des câbles contre les surtensions[3]), il en résulte qu'à 50 Hz, où l'effet pelliculaire n'est pas encore très marqué, la tension longitudinale à l'intérieur du câble n'est guère plus faible qu'en courant continu dans la gaine, mais qu'en cas de phénomènes transitoires, la gaine épaisse et bien conductrice protège très efficacement l'intérieur du câble, du fait de l'effet pelliculaire, et la tension longitudinale devient finalement négligeable. La gaine constitue alors une «cage de Faraday«, qui empêche toute pénétration de courants à des fréquences élevées.

Il est toutefois possible d'augmenter également à 50 Hz cet effet d'écran de bons conducteurs en augmentant le flux magnétique pour un même courant, grâce à la présence de fer dans la gaine.

La profondeur de pénétration (pour l'abaissement à $1/e$) est donnée par la formule plus générale:

$$X_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \varrho}{\mu f}}$$

où $\mu$ est la perméabilité relative.

Malheureusement, $\mu$ dépend beaucoup du courant, à cause des phénomènes de saturation, de sorte que l'augmentation de l'effet d'écran intéresse surtout le domaine de courant pour lequel $\mu$ présente des valeurs élevées. Dans ce cas, l'effet d'écran peut déjà être très notable à 50 Hz.

Ce qui précède permet d'en conclure que les câbles à basse tension dans des installations à haute tension doivent absolument être reliés à leurs deux extrémités à la terre de l'installation à haute tension. Le courant se-

[2]) *Zastrow, A.* et *W. Wild:* Der Mantelschutzfaktor von Fernmeldekabeln. Elektr.-Nachr.-Techn. t. 9(1932), nº 1, p. 10...26.

[3]) *Berger, K.:* Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige. Bull. ASE t. 51(1960), nº 11, p. 549...563.

condaire qui circule alors dans la gaine empêche l'apparition d'importantes surtensions dans les circuits à basse tension, surtout dans le cas de phénomènes rapides.

*Les considérations ci-dessus permettent les conclusions essentielles suivantes:*

1° Dans une installation à haute tension comprenant un ou plusieurs systèmes à haute tension, il y a lieu de n'établir qu'*une seule terre commune*, à laquelle on raccordera:

a) Toutes les *lignes de terre de protection*, aussi étroitement interconnectées que possible, aux boîtiers d'appareils, bâtis, constructions en fer, armures de bétonnage, ainsi qu'aux conduites d'eau et gaines de câbles dans la zone de l'installation, aux câbles de terre des lignes aériennes, aux extrémités mises à la terre d'enroulements de transformateurs de tension, à un pôle de l'enroulement secondaire de transformateurs de courant et de tension, aux extrémités inférieures des descentes de la protection du bâtiment contre la foudre.

b) Les lignes de terre de pôles et de points neutres de transformateurs de puissance *(lignes de terre de service)* à un endroit approprié, généralement à proximité des terres.

Les points neutres de transformateurs à basse tension doivent être reliés à la terre de l'installation à haute tension, lorsque le réseau à basse tension alimenté ne sort pas de la zone de l'installation ou est alimenté par l'intermédiaire de transformateurs d'isolement.

2° Les points neutres de *transformateurs à basse tension* (transformateurs de consommateurs), ainsi que les gaines métalliques de *câbles à basse tension* pour l'alimentation de réseaux locaux hors du complexe à haute tension, doivent être reliés à une *terre séparée pour basse tension*, disposée hors de la région de tension de la terre de l'installation à haute tension.

Dans ce cas, toute l'installation à basse tension dans le complexe à haute tension doit être isolée pour une tension d'essai de 10 kV par rapport à la terre de l'installation à haute tension et être visiblement distancée de celle-ci.

Le boîtier du transformateur à basse tension doit être relié à la terre de l'installation à haute tension, comme indiqué sous 1°. Comme terre séparée pour basse tension, on utilisera avant tout des réseaux de distribution d'eau urbains étendus, ainsi que des réseaux de la campagne, dont les conduites sont métalliques.

3° Les *installations à courant faible* qui sortent de la zone d'une terre de l'installation à haute tension seront isolées pour une tension d'essai de 10 kV dans tout le complexe à haute tension ou séparées de cette terre, vers l'extérieur, par un transformateur de protection. Dans ce cas, il suffit d'isoler pour une tension d'essai de 10 kV, par rapport à la terre de l'installation à haute tension, l'enroulement côté ligne du transformateur de protection et l'amenée de courant à ce transformateur, y compris les gaines des câbles, s'il y a lieu.

Le boîtier et le noyau du transformateur de protection doivent être reliés à la terre de l'installation à haute tension.

Le raccordement par l'intermédiaire de translateurs de protection et l'isolation des gaines de câbles par rapport à la terre de l'installation à haute tension n'est pas nécessaire lorsqu'il est prouvé que la tension longitudinale des câbles posés dans le sol ou dans des fers Zorès demeure non dangereuse pour l'isolement des installations à courant faible.

4° Les *conduites d'eau en tuyaux métalliques* (conduites d'hydrantes) dans la zone de l'installation à haute tension doivent être séparées des conduites extérieures par un tronçon isolant disposé en bordure de l'installation à haute tension, si ces conduites extérieures risquent d'atteindre des tensions dangereuses. Ce danger n'existe généralement pas dans un réseau de distribution d'eau très dense et maillé, de grandes villes. Dans ce cas, i est généralement admis de raccorder à ce réseau la terre de l'installation à haute tension, ainsi que la terre séparée pour basse tension.

**Adresse de l'auteur:**
*K. Berger*, Dr ès sc. techn., professeur à l'EPF, ingénieur chargé des essais de la FKH, 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.

# Zerstörungsfreie Prüfung auf Porosität mit Ultraschall von Fahrleitungs-Vollkernisolatoren der Schweizerischen Bundesbahnen

Von *H. Merz*, Bern

620.179.16 : 621.315.624.63

*Es werden zerstörungsfreie Prüfungen an ausgebauten Porzellan-Stabisolatoren mit Ultraschall beschrieben und die Messresultate erläutert.*

*Description des essais non destructifs, à l'aide d'ultrasons, auxquels ont été soumis des stabilisateurs en porcelaine démontés, et interprétation des résultats des mesures.*

## 1. Poröses Porzellan

Im Fahrleitungsnetz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wurden seit 1937 über 110 000 Hochspannungs-Vollkernisolatoren (Langstabisolatoren) aus Porzellan, Typ gemäss Fig. 1, eingebaut. In den Jahren 1952/53 traten an diesen Isolatoren erstmals Brüche auf. Eingehende Untersuchungen ergaben, dass es sich um saugfähiges, poröses Porzellan handelt. In den folgenden Jahren führte man über die Isolatorenbrüche eine genaue Statistik, um Fabrikat und Lieferjahr der defekt gewordenen Vollkernisolatoren festzustellen. Es zeigte sich dabei, dass Isolatoren bestimmter Lieferjahre besonders häufig Brüche infolge Porosität aufweisen. In den vergangenen Jahren 1952—1960 sind im ganzen 228 Stück (etwa 2 ‰ des Gesamtbestandes an Vollkernisolatoren im Fahrleitungsnetz) defekt geworden, d. h. im Mittel pro Jahr 25 Isolatoren. Derartige Isolatorbrüche verursachen jeweils sehr unangenehme Betriebsstörungen. Auf einzelnen Linien, wo seinerzeit bei der Elektrifikation vorwiegend ein bestimmtes Fabrikat eingebaut wurde, mussten sämtliche Vollkernisolatoren ausgewechselt werden. Die meisten Brüche verteilen sich jedoch willkürlich auf verschiedene Strecken und Netzteile, wodurch ein systematischer Austausch erschwert wird.

Mit den bisher üblichen Prüfmethoden konnte poröses Porzellan — leichte Brennporosität — nicht mit genügender Sicherheit störungsfrei festgestellt werden. Poröse, saugfähige Isolatoren überstehen meistens die mechanischen und elektrischen Abnahmekontrollen und versagen erst später nach einigen Jahren im Betrieb. Es besteht dadurch eine gewisse Unsicherheit, eine Lücke in der Prüfung von Hochspannungs-Langstab- bzw. Vollkern- und Motorisolatoren. Nicht dicht gebranntes Porzellan bleibt mehr oder weniger saugfähig. Die nicht vollständig geschlos-