

Cet article décrit le problème de l'examen expérimental de grandes prises terre pour installations à haute tension en partie très diverses, et décrit les méthodes de mesure appliquées. En vue d'assurer l'application des exigences relatives à la sécurité des personnes, il suffit en général de saisir les tensions de contact et de pas ou de déterminer la tension de prise de terre d'une installation. On verra cependant que la saisie systématique de la répartition des courants de terre permet en outre d'obtenir d'utiles renseignements de la situation et l'état de mise à la terre d'une installation à haute tension.

Le présent article est basé sur un exposé que l'auteur a tenu le 20 septembre 1996 à Lucerne lors de la journée d'information CEH / UCS „Prises de terre pour installations de production d'énergie; exigences, méthodes de calcul, nouvelles méthodes de mesure“.

La méthodologie de mesures dans le contrôle des grandes installations de mise à la terre

Adresse de l'auteur:

Dr. Reinhold Bräunlich, Commission d'étude des questions relatives à la haute tension CEH, Voltastrasse 9, 8004 Zurich

1. Introduction

Les mesures des prises de terre ont une tâche primaire de sécurité importante: Leur but est de contrôler l'efficacité des prises de terre. Dans la zone d'influence des installations électriques il ne doit se manifester, ni en service ni en cas de perturbations, des différences de potentiel terrestre ou des courants de terre qui peuvent menacer des êtres vivants ou des équipements techniques. Ces exigences sont formulées sous la forme de valeurs limites dans les règles de L'ASE 3569-1.1985: "Mise à la terre comme mesure de protection dans les installations à courant fort" [1] et individuellement dans l'Ordonnance en vigueur sur les installations à courant fort (édition mars 1994) [2].

Les installations neuves ou modifiées doivent à cet effet être contrôlées au moyen de **mesures des prises de terre**. Dans les prises de terre existantes, la preuve expérimentale de leur efficacité doit être répétée tous les dix ans.

Les exigences à contrôler lors des mesures des prises de terre, posées aux prises de terre contiennent aussi concrètement l'observation réglée par la législation des **tensions de contact et de pas** maximales garantissant le **sécurité des personnes** et réduisant les influences néfastes sur les équipements techniques étrangers.

Outre le contrôle des aspects de la technique de sécurité, il convient d'évaluer aussi la situation de mise à la terre d'une installation électrique selon des **points de vue de l'exploitation**. Au centre se trouvent des clarifications sur l'évitement **d'influences perturbatrices** et **surcharges** des propres équipements d'exploitation et lignes en cas de défaut à la terre ou des examens en vue de minimiser les pertes d'énergie en service en raison de boucles conductrices mises à la terre.

Pour remplir tous ces objectifs il ne faut pas se contenter de considérer la seule prise de terre, mais d'y intégrer aussi d'autres facteurs, telles la **situation du réseau** et les propriétés de l'ensemble de l'**installation** électrique et ses **alentours**. Ce faisant, il faut en particulier considérer que les mesures individuelles réalisées lors du contrôle d'une prise de terre ne

peuvent l'être que par des *sondages* et que le choix de tels échantillons présume une connaissance précise de la situation globale de l'installation contrôlée.

Avec les méthodes de mesure décrites ci-après on examine pour l'essentiel les conditions de mise à la terre dans les cas de *phénomènes à fréquence de réseau*. Cela concerne dans un sens très large le contrôle de la prise de terre dans le *cas de défaut à la terre*. La conception de la prise de terre aussi a lieu en général selon les exigences du défaut à la terre. Un tel événement donne lieu à un courant de défaut à la terre le plus souvent élevé qui retourne par l'intermédiaire de la prise de terre vers la source qui alimente le défaut à la terre. Le trajet du courant de retour chemine d'une part par l'intermédiaire des prises de terre de l'installation par le *sol*, mais aussi d'autre part par l'intermédiaire de *conducteurs mis à la terre* (fils de terre, gaines des câbles). La fraction respective du courant à la terre varie fortement en fonction de la structure de l'installation et du réseau.

C'est pourquoi dans une mesure de prise de terre selon la méthode tension-courant [3] on simule pour l'essentiel un défaut à la terre à courant réduit. Lors du passage d'une fraction du courant de défaut à la terre dans le sol se produisent des différences de potentiel que l'on examine par des *mesures de la tension* (voir figure 1). Mais la fraction restante du courant de défaut à la terre qui s'écoule comme courant de retour dans des fils de terre, doit être saisie par des *mesures de l'intensité* (voir par ex. courant du conducteur de terre figure 2). Un contrôle d'une prise de terre consiste par conséquent en des mesures de *différences de tension et de courants de compensation* sur des points choisis de la prise de terre, qui résultent de courants de défaut à la terre.

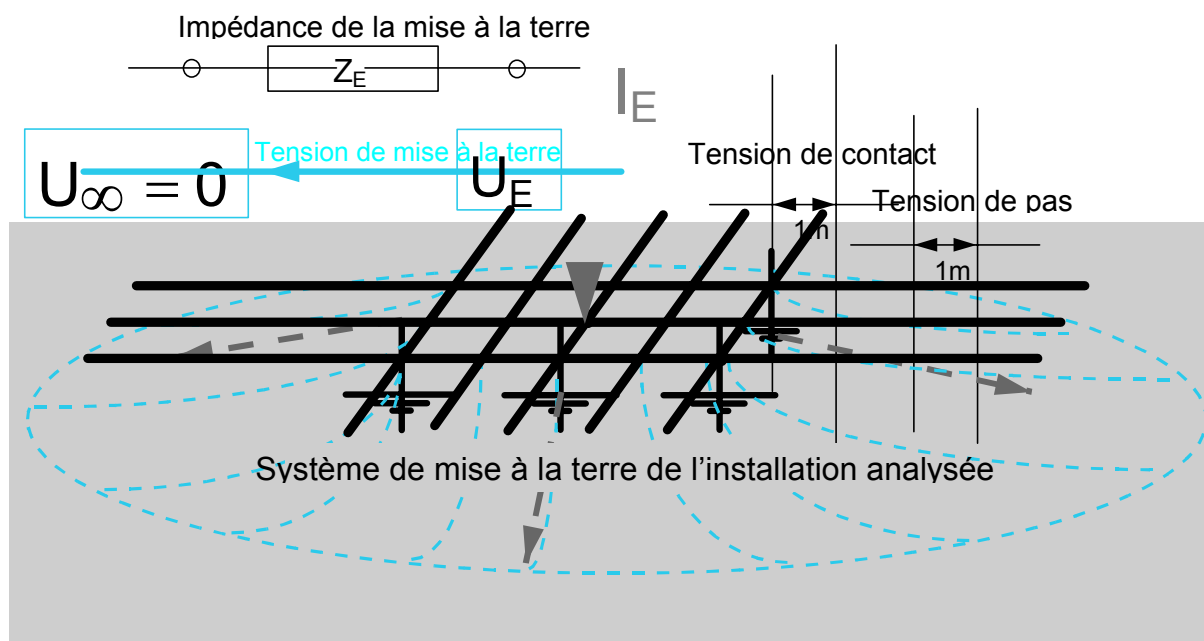


Figure 1 Principe de base d'une mesure de prise de terre: Un courant de défaut à la terre I_E est injecté dans la prise de terre. Ce courant passe dans le sol et produit dans les alentours de l'installation une augmentation de potentiel en entonnoir U_E . Dans la zone de transition se produisent des tensions de pas et de contact que l'on peut mesurer et interpréter.

A l'issue d'une campagne de mesures il convient d'évaluer et de documenter l'efficacité de la prise de terre et des tensions de contact et de pas qui se manifestent en cas de défaut à la terre. Cette évaluation implique une analyse de la situation de la prise de terre, tirée d'un grand nombre de valeurs de courant et de tension mesurées. L'exploitant doit tirer les conclusions qui s'imposent et dont il faut déduire le cas échéant les points faibles de la prise de terre et autres mesures d'optimisation.

2. Injection du courant de défaut à la terre - Formation d'une boucle de courant de défaut à la terre

Le contrôle de la répartition du courant et du potentiel d'une prise de terre dans le cas de défaut à la terre est toujours basée pour l'essentiel sur la méthode tension-courant: A cet effet on produit un courant de défaut à la terre défini I_E (quelques A jusqu'à quelques centaines d'A) à partir d'une source de courant alternatif ou de courant pulsé monophasé et l'injecte dans une boucle de défaut à la terre définie, qui contient les prises de terre à contrôler. Pour constituer la boucle de défaut à la terre dans les grandes installations on prend si possible une ligne aérienne ou câblée mise hors service, qui est mise à la terre dans un poste correspondant (cf. Figure 2). Normalement les installations contrôlées restent néanmoins en service, de sorte qu'il faut tenir compte lors de ces mesures des perturbations possibles résultant de l'exploitation de l'installation (50 Hz et harmoniques).

La distance entre les deux sous-stations pour la boucle de mise à la terre doit être suffisamment grande afin d'exclure toute influence perturbatrice réciproque. Pour réduire l'impédance de boucle du défaut à la terre pour les distances nécessaires, on connecte normalement en parallèle les phases des lignes aériennes ou en câble par l'intermédiaire desquelles se fait l'injection du défaut à la terre.

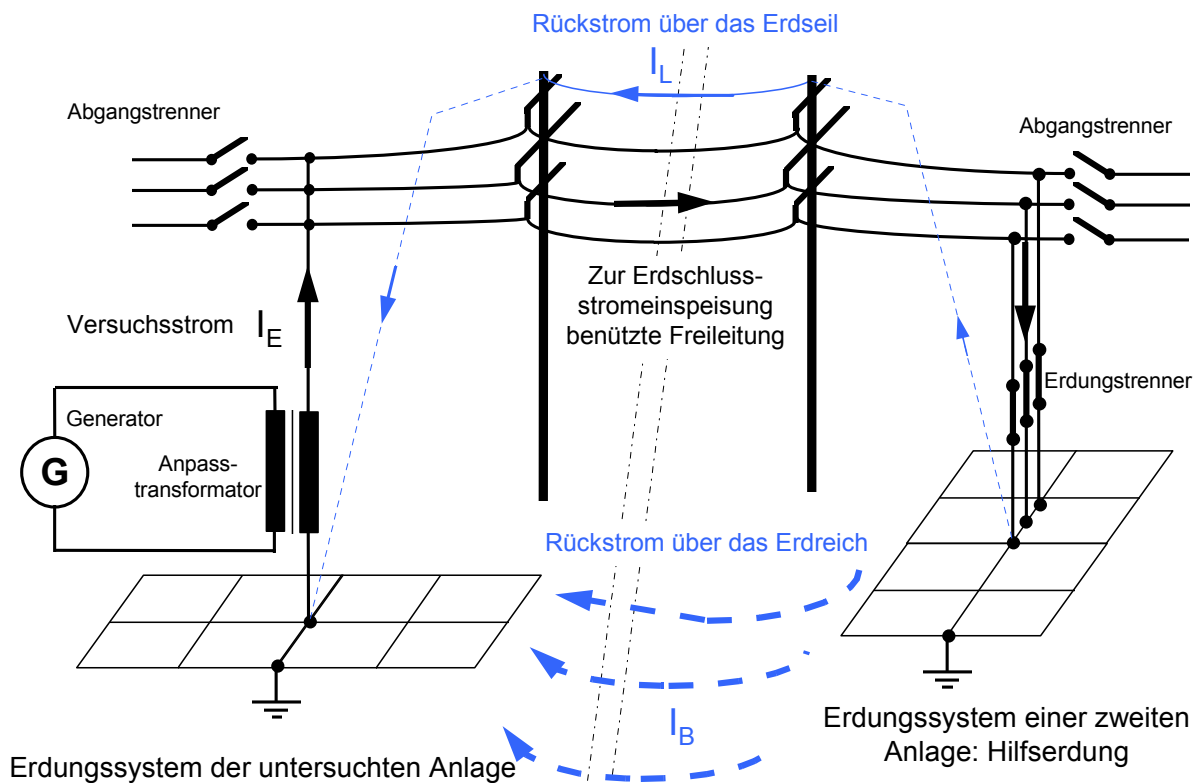


Figure 2 Boucle de défaut à la terre par l'intermédiaire des prises de terre de deux sous-stations utilisant une ligne aérienne. La somme du courant de retour dans le sol I_B et du courant de retour dans le conducteur de terre I_L donne le courant de défaut à

la terre I_E injecté expérimentalement.

Du fait du courant de boucle le potentiel de la prise de terre contrôlée est relevé de la tension de mise à la terre U_E , qui prend la forme d'une **colline de potentiel** qui chute avec la croissance de la distance de la limite extérieure de la prise de terre. Les objets situés dans cet entonnoir de potentiel se trouvent dans un gradient de potentiel et présentent de la sorte des différences de tension par rapport aux alentours que l'on peut mesurer comme **tensions de contact et de pas** à l'aide de voltmètres appropriés¹⁾.

Comme cela a été cité dans l'introduction, les courants générés dans la boucle de défaut à la terre établie expérimentalement (comme aussi dans le cas de défaut à la terre) **ne retournent par exclusivement par le sol** à la terre de référence, ils y cheminent pour l'essentiel par l'intermédiaire des fils de terre et des gaines de câbles des départs de lignes. D'autres structures conductrices étendues aux alentours de la prise de terre, comme les conduites, installations ferroviaires, lignes téléphoniques, véhiculent des courants de terre. La saisie de ces courants de terre guidés fait également partie d'une mesure de la mise à la terre.

Tous les résultats de mesure (tensions de contact et de pas et conducteurs de courant de terre) sont extrapolés ultérieurement de manière linéaire en un **courant de défaut maximal à la terre** de l'installation contrôlée. Le courant maximal de défaut à la terre d'un poste de distribution d'énergie haute tension rigidement mis à la terre se produit normalement lors d'un défaut terrestre unipolaire sur un jeu de barres et dépend de l'état du réseau.

Dans les **grands prises de terre** pour sous-stations et installations de centrales motrices on a besoin d'une source de courant de quelques dizaines d'A jusqu'à quelques centaines d'A pour l'injection du courant de défaut à la terre $s I_E$. La CEH utilise à cet effet un groupe Diesel-électrogène mobile de 100 kVA. L'alternateur asynchrone délivre à ses bornes une tension de sortie d'env. 500 V. Pour l'adaptation à l'impédance de la ligne d'essai on insère un transformateur d'adaptation entre l'alternateur et le point d'injection du défaut à la terre.

Dans les **petites prises de terre**, par exemple pour postes de transformation et sectionneurs de terre sur poteau, on utilise des instruments de mesure de mise à la terre (voltmètres intégrant une source de courant), la terre de référence étant réalisée par des piquets de terre. Pour mesurer l'impédance de certaines boucles de terre des pinces de mesure du courant de terre sont proposées depuis peu sur le marché.

3. Problème fondamental des mesures des prises de terre

Même si l'on maîtrise tous les problèmes de méthodologie de mesure, comme l'élimination des tensions de perturbation (voir chapitre 4), les mesures des mises à la terre restent affectées d'une série de **problèmes fondamentaux** qui entraînent souvent une incertitude considérable lors de l'interprétation des valeurs mesurées. La **reproductibilité** des mesures des prises de terre est soumise elle aussi à des limites indispensables. Les problèmes qui en sont responsables sont énumérés par la suite et commentés succinctement là où cela est nécessaire. Quelques-uns des problèmes en suspens peuvent être liquidés par une procédure de mesure standardisée. Certains aspects spéciaux des méthodes de mesure devraient être examinés en partie à l'aide d'essais pratiques sur des prises de terre.

1) Un entonnoir de potentiel se forme aussi autour de la prise de terre utilisée pour la terre de référence (électrode de terre auxiliaire). C'est pourquoi les deux prises de terre peuvent être contrôlées de même avec la même boucle de défaut à la terre.

1. La **résistance spécifique** du sol **n'est pas constante dans le temps**. Elle est soumise à des variations saisonnières qui dépendent de l'humidité du sol et de la température [3,4].
2. Après la pose de nouveaux conducteurs en contact avec le sol, le compactage du sol entraîne aux alentours des électrodes une réduction lente de la **résistance de passage à la terre** qui dure normalement de nombreux mois [3].
3. Le pouvoir conducteur de la terre diminuant pour des raisons géologiques vers les grandes profondeurs, les éventuels courants de défaut à la terre ne forment pas de champs d'écoulement hémisphériques autour de la prise de terre. Les courants de terre s'écoulent de manière accrue à la surface. Si l'on néglige d'abord les effets du courant alternatif (voir Figure 3), la densité de courant respectivement la résistivité du champ électrique d'un dispositif individuel de mise à la terre croissent d'abord avec le carré de la distance puis de manière quasi-linéaire à une distance plus éloignée..

Pour plus de commodité on adopte pour la considération ci-dessous une prise de terre limitée par une hémisphère. Exprimée en termes mathématiques la tension de mise à la terre U_E est l'intégral de l'intensité du champ résistif $E_E(r)$ du bord du système de mise à la terre ($r=r_0$) jusqu'à une distance indéfiniment grande.

$$U_E = \int_{r_0}^{\infty} E_E(r) dr = \int_{r_0}^{\infty} E_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-k} dr \quad 1 < k < 2$$

E_E : Intensité du champ résistif autour de la prise de terre [V/m]

r : Distance du centre de la prise de terre [m]

r_0 : Rayon de la prise de terre [m]

E_0 : Intensité du champ résistif à la limite de la prise de [V/m]

k : Exposant dépendant du sous-sol géologique pour la forme de l'entonnoir de tension décroissant

Comme dans la pratique il n'est pas possible de saisir le profil d'entonnoir de tension jusqu'à une distance infiniment grande, la tension de prise de terre U_E et par conséquent aussi l'impédance de prise de la terre $Z_E=U_E/I_E$ de l'installation dépendent de la distance de la prise de terre, à laquelle a lieu l'interprétation du potentiel d'entonnoir pour la détermination de la tension de mise à la terre. Dans le cas limite de la propagation étendue du courant ($k=1$) l'impédance de prise de terre serait par trop infiniment grande (voir aussi [7] chapitre D, paragraphe f: „Prises de terre en sols avec couche supérieure conductrice sur sous-sol mauvais conducteur“).

4. Le problème décrit sous l'aspect 3 de l'incertitude liée à la définition de l'impédance de prise de terre se complique encore du fait que les courants de défaut à la terre sont des courants alternatifs à fréquence d'exploitation qui sont soumis à des effets pelliculaires dans le sol (voir figure 3). Les courants alternatifs dans le sol ne se propagent pas de manière quelconque, il visent à fermer le circuit de défaut à la terre dans une boucle aussi étroite que possible. Les courants de retour de défaut à la terre dans le sol ne retournent donc pas selon un champ électrique d'un dipôle (figure 3 en haut) vers la terre de référence, ils s'écoulent dans un corridor étroit de quelques centaines de m de large le long de la conduite qui alimente le défaut à la terre (figure 3 en bas). Pour cette raison il se forme une **répartition** fortement **asymétrique des courants de terre** autour de la prise de terre contrôlée, d'autant plus que le courant de défaut à la terre n'est injecté que d'un côté.

Grâce à la **profondeur de pénétration du courant** ou du champ magnétique dans le sol δ on peut donner des informations quantitatives sur la propagation des courants de terre.

$$|\delta| = \sqrt{\rho / \omega \mu_0}$$

δ : Profondeur de pénétration, du courant de retour via la terre [m]

ρ : Résistance spécifique du sol [Ωm]

ω : Fréquence angulaire du courant à la terre [s^{-1}]

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [$4\pi \times 10^{-7} Vs/Am$]

Pour les résistances du sol spécifiques qui se présentent dans la pratique de $10 \Omega m$ à $1000 \Omega m$ il résulte pour une fréquence du réseau de $50 Hz$ des profondeurs de pénétration δ comprises entre $150 m$ et $1500 m$. Du lien ci-dessus il faut conclure que l'impédance de prise de terre mesurée d'une installation ne dépend pas seulement (selon le point 3.) de la distance d'interprétation, mais **du sens du profil d'entonnoir de tension mesuré** par rapport au du sens d'alimentation du courant de défaut à la terre et aussi de sa **fréquence**.

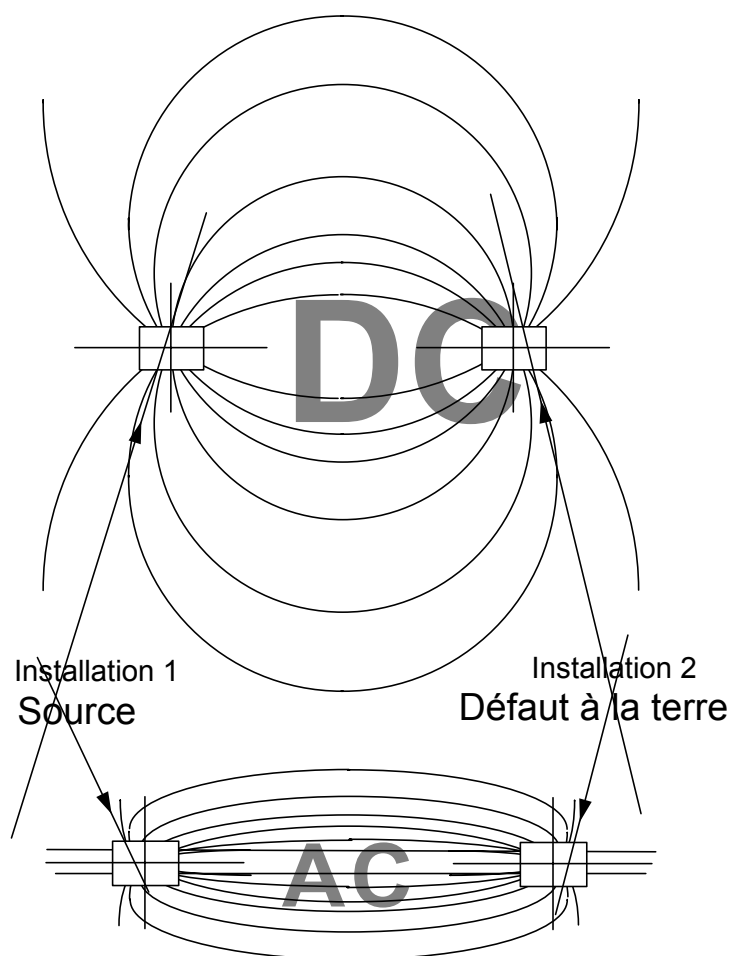


Figure 3 Lignes de courant dans le champ résistif entre deux prises de terre, représentative, en haut: dans le cas de courant continu, en bas: dans le cas de courant alternatif. Dans les deux cas on a dans l'installation 2 un défaut à la terre qui est injecté par l'intermédiaire d'une conduite de l'installation 1. On notera dans le cas du courant alternatif la concentration des lignes de courant du côté respectif du départ de ligne.

Les prises de terre, particulièrement pour les grosses installations électriques dont le diamètre atteint un ordre de grandeur de la profondeur de pénétration du courant δ , c'est-à-dire quelques centaines de m , possèdent de ce fait une répartition des courants de terre qui dépend fortement sur sens de la ligne alimentant le défaut à la terre. Par cela, les tensions de contact et de pas mesurées autour de l'installation dépendent fortement de la ligne d'essai choisie qui porte le courant de défaut à la terre de mesure. Cette circonstance aggrave en particulier alors l'appréciation de la situation de mise à la terre lors des mesures des prises de terre pour grosses installations si une seule variante d'alimentation est examinée.

5. Grâce à des *parties de l'installation délocalisées, mais connectées à la terre*, comme par exemple des poteaux terminaux d'exécutions câblées, on ne dispose pas de limitation

claire de la prise de terre. L'impédance de prise de terre n'est pas définissable de manière précise, notamment pour cette raison. En outre, le facteur de réduction pour tensions de contact et de pas défini par des mesures (rapport du courant de mise à la terre au courant de défaut à la terre) dépend du point précis auquel on saisit le courant de retour du câble de garde de lignes aériennes ou le courant de retour de l'écran du câble. Finalement, le résultat mesures des tensions de contact et de pas dépend encore plus du sens de la ligne alimentant le défaut à la terre à cause des ramifications citées de la prise de terre.

Des aspects ci-dessus il ressort clairement que seule l'injection d'un courant de défaut à la terre via toutes les lignes alimentant le défaut à la terre produit une image correcte de la situation du défaut à la terre. Une telle mesure de prise de terre, pour des raisons pratiques, n'est bien faisable qu'exceptionnellement. Mais pour réaliser néanmoins des mesures des prises de terre pour le moins reproductibles, il faudrait avoir une *procédure* standard *pour la réalisation de mesures des prises de terre sur grosses prises de terre*. Pour le moment, de telles directives ou recommandations appropriées font défaut en Suisse.

4. Méthodes pour éliminer les tensions de perturbation

Les installations de distribution et les centrales motrices étant normalement en service pendant les mesures des prises de terre, on peut injecter par couplage ohmique ou inductif des tensions de perturbation dans la boucle de courant d'essai ou la boucle de mesure. La superposition de telles tensions de perturbation génère facilement des falsifications considérables des valeurs de mesure si on ne les élimine pas par des mesures appropriées [3,5].

Outre les signaux de perturbation à fréquence d'exploitation de l'installation à courant fort (50 Hz ou. $16^{2/3}$ Hz) des harmoniques de réseau et des courants continus peuvent entraîner des erreurs de mesure.

Au tableau I figurent les méthodes usuelles servant de mesures contre les tensions de perturbation.

1.	Méthode par battement
2.	Méthode marche/arrêt
3.	Méthode d'inversion
4.	Voltmètre à vecteurs, redresseur synchrone, amplificateur de capture
5.	Choix d'une fréquence différente de la fréquence du réseau, filtrage des fréquences perturbatrices

tableau I Méthodes de suppression des interférences dans les mesures des mises à la terre.

Dans la *méthode par battement* (méthode 1) on choisit pour le courant d'essai une fréquence différant légèrement de celle du courant de service (écart inférieur à 1 Hz). De la superposition des tensions de perturbation U_s à fréquence de réseau par la tension de mesure U_m il se produit un effet de battement qui fait varier l'aiguille du voltmètre entre une valeur maximale U_{max} et une valeur minimale U_{min} . La tension de mesure se calcule à partir des valeurs extrêmes de l'instrument indicateur selon la Figure 4. Il va de soi que l'incertitude de lecture dépend de l'habileté de l'opérateur et de la constante de temps de l'instrument.

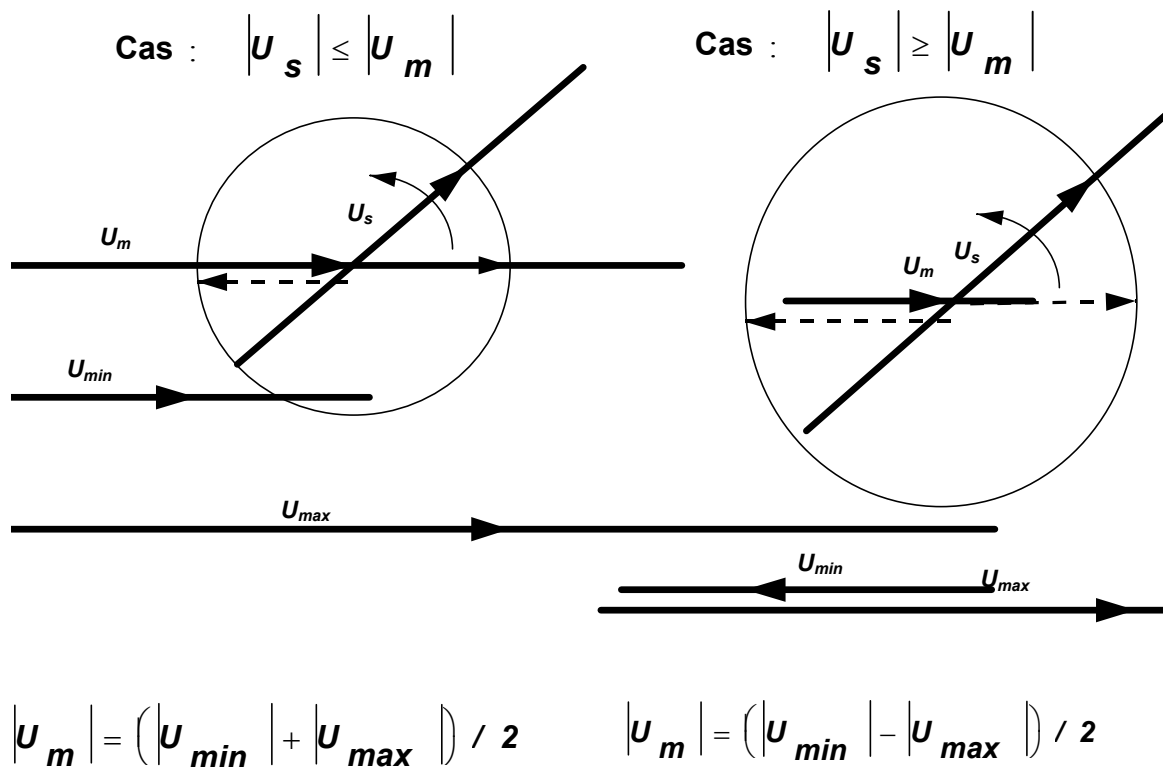


Figure 4 Les diagrammes vectoriels pour la détermination de la tension de mesure U_m avec la méthode par battement en éliminant les interférences à fréquence de réseau pour le cas où la tension de mesure est supérieure à la tension de perturbation (à gauche) et pour le cas où la tension de mesure est inférieure à la tension de perturbation (à droite).

Dans la *méthode marche/arrêt* et la *méthode d'inversion* (méthodes 2 et 3) on produit un courant d'essai à fréquence du réseau que l'on enclenche et déclenche périodiquement. Dans la méthode d'inversion on inverse en outre les deux phases de la source à chaque enclenchement. Toutes les mesures sont alors réalisées la source de courant d'essai déclenchée (mesure de U_s) et la source de courant d'essai enclenchée, avec mesure dans la méthode d'inversion des deux polarités (U_1 en cas de polarité positive, U_2 en cas de polarité négative et U_s le courant d'essai arrêté). On remarquera que la méthode d'inversion ne délivre des valeurs utiles que si le courant d'essai est *absolument rigide en phase avec le courant de ligne*. En outre, le courant de ligne injecté comme grandeur perturbatrice pendant les trois relevés sur un point de mesure reste constant.

Alors que la méthode marche/arrêt avec mesures par voltmètre ne peut fournir qu'une limite supérieure pour l'erreur de mesure, il y a dans la méthode d'inversion une relation sans équivoque entre les trois valeurs de mesure et la tension de mesure U_m générée par le courant d'essai (voir Figure 5).

On a présenté tout récemment une méthode marche/arrêt utilisant un système de mesure et d'interprétation sur ordinateur qui permet une élimination efficace des interférences [6].

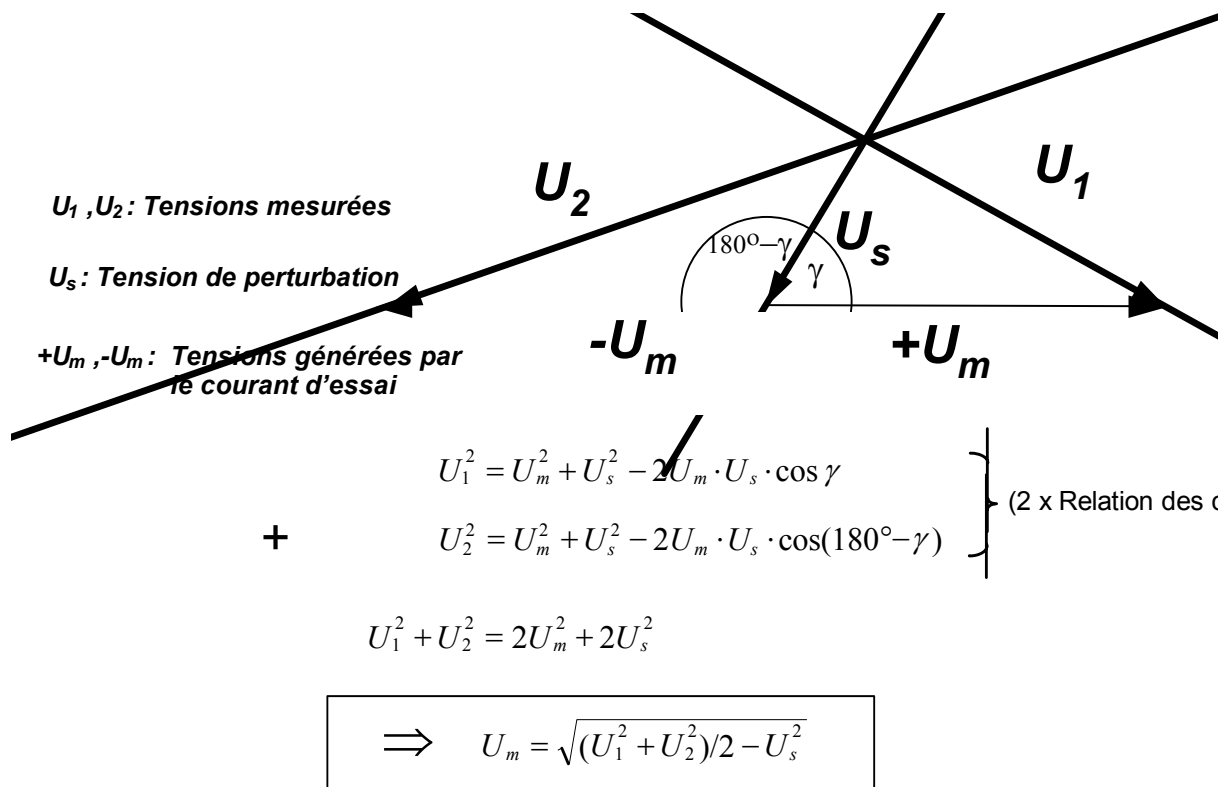


Figure 5 Diagrammes vectoriels pour la détermination de la tension de mesure avec la méthode d'inversion par élimination des superpositions à fréquence de réseau de la grandeur mesurée de la tension de perturbation sans courant d'essai et les grandeurs mesurées pour les deux polarités de la source de courant d'essai.

La CEH a collecté par le passé quelques expériences avec les méthodes 1, 2, 4 et 5 (voir tableau I). Par ce faire, l'utilisation d'une fréquence différent de celle du réseau pour le courant d'essai (méthode 5) a fait largement ses preuves. La méthode est utilisée dans des cas individuels en combinaison avec un redressement synchrone (méthode 4).

Pour produire le courant d'essai, la CEH utilise un alternateur asynchrone qui fonctionne sur env. 60-70 Hz. La fréquence différent de 50 Hz du courant de prise de terre injecté permet une séparation simple et efficace des courants de mise à la terre d'essai des courants de mise à la terre de service. Pour déterminer les tensions de contact et de pas on utilise un **filtre hautement sélectif** approprié qui supprime efficacement une influence perturbatrice des résultats de mesures due au fonctionnement de l'installation à 50 Hz ou aux courants de traction à $16^{2/3}$ Hz.

Pour mesurer les répartitions du courant on utilise aussi des **amplificateurs de capture ou des redresseurs synchrones** (méthode 4) qui autorisent une mesure très sensible des fractions du courant de prise de terre en amplitude et phase. De tels appareils électroniques d'avant-garde permettent de réaliser sans problèmes des mesures précises dans les grosses installations et petits courants d'essai (quelques 10 A). Cette méthode de mesure implique le transfert d'un **signal de référence** de la source de courant d'essai vers le lieu de mesure.

Au tableau I figurent les avantages et les inconvénients des différentes mesures permettant l'élimination des influences perturbatrices.

<i>Méthode</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Mesure</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
1. Méthode marche/arrêt	Quelconque	Deux opérations de mesure, sans filtre	Simplicité	Pas d'élimination des erreurs, seulement évaluation des erreurs
2. Méthode d'inversion	Fréquence du réseau	Trois opérations de mesure, sans filtre	Détermination sans équivoque des tensions de mesure, mesure à la fréquence du réseau	Pas d'élimination des harmoniques, mesure triple
3. Méthode par battement	Ecart par rapport à la fréquence du réseau < 1 Hz	Temps de mesure quelques secondes sans filtrer	Mesure à presque toutes les fréquences du réseau	Interprétation pas toujours sans équivoque
4. Voltmètre à vecteurs, amplificateur de capture	Quelconque	Une opération de mesure avec appareil de mesure spécial	Suppression de toutes les perturbations possible	Signal de référence de la source de courant d'essai nécessaire
5. Filtrage des fréquences perturbatrices	Ecart par rapport à la fréquence du réseau > 10 Hz	Une opération de mesure avec filtre	Suppression de toutes les perturbations possible	La fréquence de mesure ne correspond pas à celle du réseau

Tableau II Récapitulation des propriétés, avantages et inconvénients des différentes méthodes d'élimination des interférences lors de mesures des prises de terre.

5. Détermination des profils de tension et impédances des prises de terre

Pour une appréciation plus précise des prises de terre on peut se servir de l'allure du profil de la tension de prise de terre ou de l'entonnoir de tension de prise de terre. Pour déterminer le profil d'un entonnoir de tension on mesure les différences de tension entre la terre de l'installation (référence) et une sonde de mesure enfichée dans le sol à endroits définis (par ex. 1 m, 5 m, 10 m, 100 m de distance par rapport à l'installation) le long d'une direction préétablie (voir Figure 6).

L'allure d'un profil de tension permet d'apprécier surtout la zone de transition de l'installation et l'efficacité des mesures de commande du potentiel d'une prise de terre. En particulier ressortent ici directement les *gradients de potentiel*. Les tensions de pas qui se manifestent peuvent être extraites comme différences de tension du profil de tension mesuré.

Si le profil de tension dispose d'une distance suffisamment grande, on peut définir l'*impédance de prise de terre* efficace de l'installation à contrôler. Le montant de l'impédance de prise de terre Z_E est défini comme le rapport de la tension d'entonnoir maximale U_E (asymptote) au courant de mise à la terre I_E , ou au courant de mesure I_M : qui a provoqué cette tension

$$Z_E = U_E / I_E$$

Une raison importante de la mesure des profils de tension est la question de la hauteur de la tension de passage à la terre U_E . Si U_E est inférieure à la tension de contact maximale admissible on peut pratiquement *renoncer* à la *mesure des tensions de contact et de pas*.

Les difficultés décrites au chapitre 2 et les expériences de la CEH font ressortir cependant que la tension d'entonnoir mesurée de cette manière dépend fortement du sens du profil mesuré (par rapport au départ de ligne avec le courant de prise de terre injecté expérimentalement). Mais on obtient des valeurs reproductibles pour une impédance de prise de terre mesurée si le

sens du profil se trouve *quelque peu à angle droit de la conduite d'alimentation du défaut à la terre* et s'il n'y a pas en outre d'autres départs de lignes et de structures en contact avec le sol dans le sens de la mesure du profil.

Ces exigences satisfaites, se manifeste alors, en particulier par l'*effet pelliculaire de courant* (à 50 Hz) relativement bientôt (après quelques centaines de mètres) une saturation dans l'allure du potentiel. Cela permet de déterminer une valeur sans équivoque et utile pour une tension de prise de terre „apparente“. Il est toujours recommandé de relever *au minimum deux profils d'entonnoir de tension*, pour que la reproductibilité des mesures puisse être contrôlée.

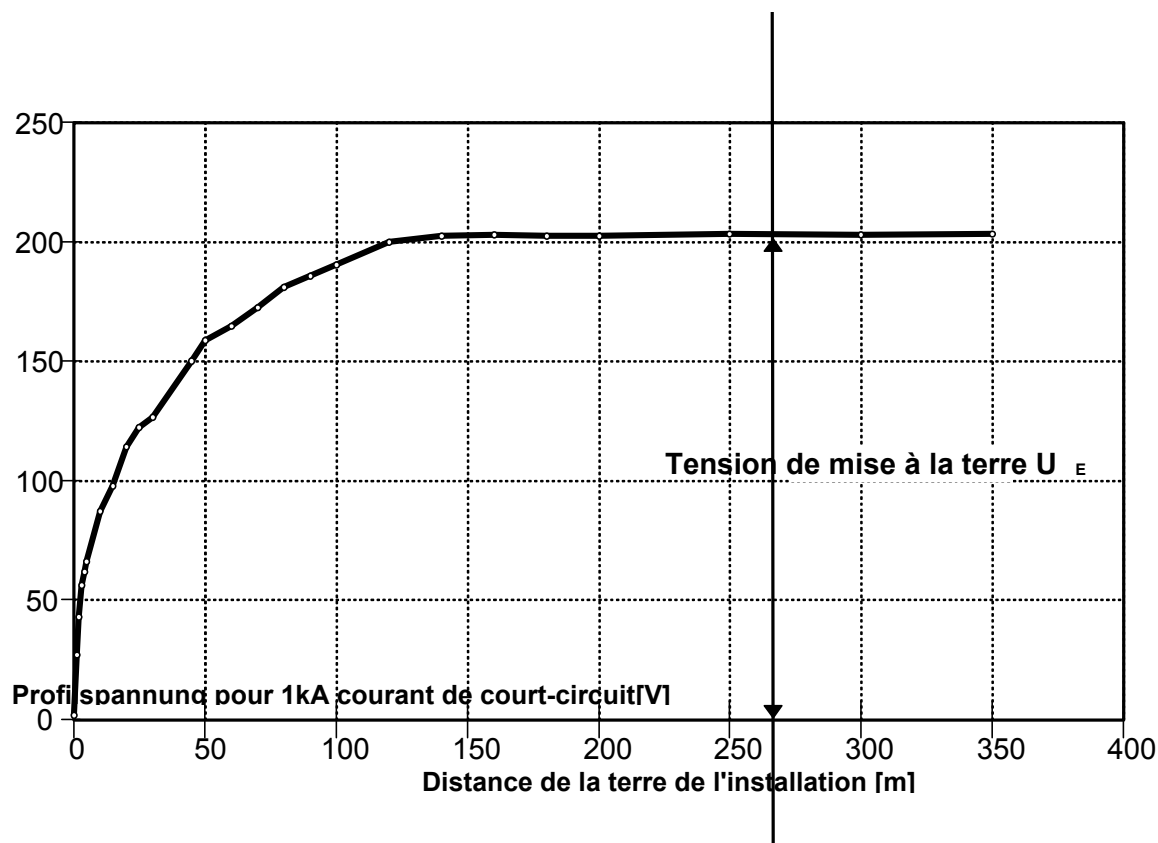


Figure 6 Exemple d'un profil d'entonnoir de tension mesuré d'une installation à haute tension de moyenne taille. Cette allure de profil produit une impédance de prise de terre Z_E de quelque $205 m\Omega$.

6. Mesure des tensions de contact, de pas et différentielles

Lors de la mesure des *tensions de contact* et *de pas*, la différence de tension à 1 m de distance de l'objet conducteur considéré est prélevée au moyen de sondes de potentiel ou de câbles de mesure. Comme sondes de potentiel pour la prise de contact dans le sol on se sert de piquets en acier enfoncés d'env. 10 à 20 cm dans le sol. Dans des cas définis on mesure aussi les *tensions différentielles* entre deux objets protégés contre les contacts directs, d'objets en métal (par ex. entre poteaux métalliques, candélabres, etc.). Lors de ces mesures la distance pour la prise de tension est variable et doit être prise en considération jusqu'à 1.75 m selon les Règles de l'ASE 3659 [1].

Pour mesurer les tensions de contact, différentielles et de pas on a développé à la CEH un voltmètre² sélectif spécial. Pour supprimer les interférences à basse fréquence, l'appareil de

2 Une documentation correspondante du voltmètre CEH est disponible.

mesure contient en option des filtres coupe-bande qui peuvent être enclenchés sélectivement pour 50 Hz et $16^{2/3}$ Hz. L'appareil permet une mesure digitale directe des tensions de 10 mV à 1000 V.

L'injection du courant de défaut à la terre à des fréquences de 60 Hz à 70 Hz et la suppression sélective (env. 40 dB) des perturbations à fréquence de réseau (50 Hz) ou de composantes perturbatrices du courant de traction ($16^{2/3}$ Hz) permettent en règle générale la saisie fiable même des petits signaux utiles dans la gamme mV.

Sur chaque point de mesure on pratique deux mesures. Dans la première on mesure la tension directement via la résistance d'entrée à haute impédance du filtre actif. Dans la seconde, on branche en parallèle à l'entrée du filtre une impédance de $2\text{ k}\Omega^3$. La première mesure produit la tension existante réellement sur le point de mesure, alors qu'avec la seconde on mesure la tension qui se présenterait sur le point de mesure si celui-ci était chargé de la résistance du corps humain. Aussi a-t-on recours aux tensions mesurées avec cette *impédance de charge* pour les interprétations.

A l'issue des mesures des mises à la terre il faut évaluer et documenter l'efficacité de la prise de terre et des tensions de contact et de pas qui se manifestent en cas de défaut à la terre.

On établit en standard des graphiques à bandes présentant les tensions de contact et de pas, les grandeurs mesurées sont extrapolées pour un courant de défaut à la terre de 1 kA ou sur le courant de défaut à la terre maximal possible. Un exemple est représenté à la Figure 7.

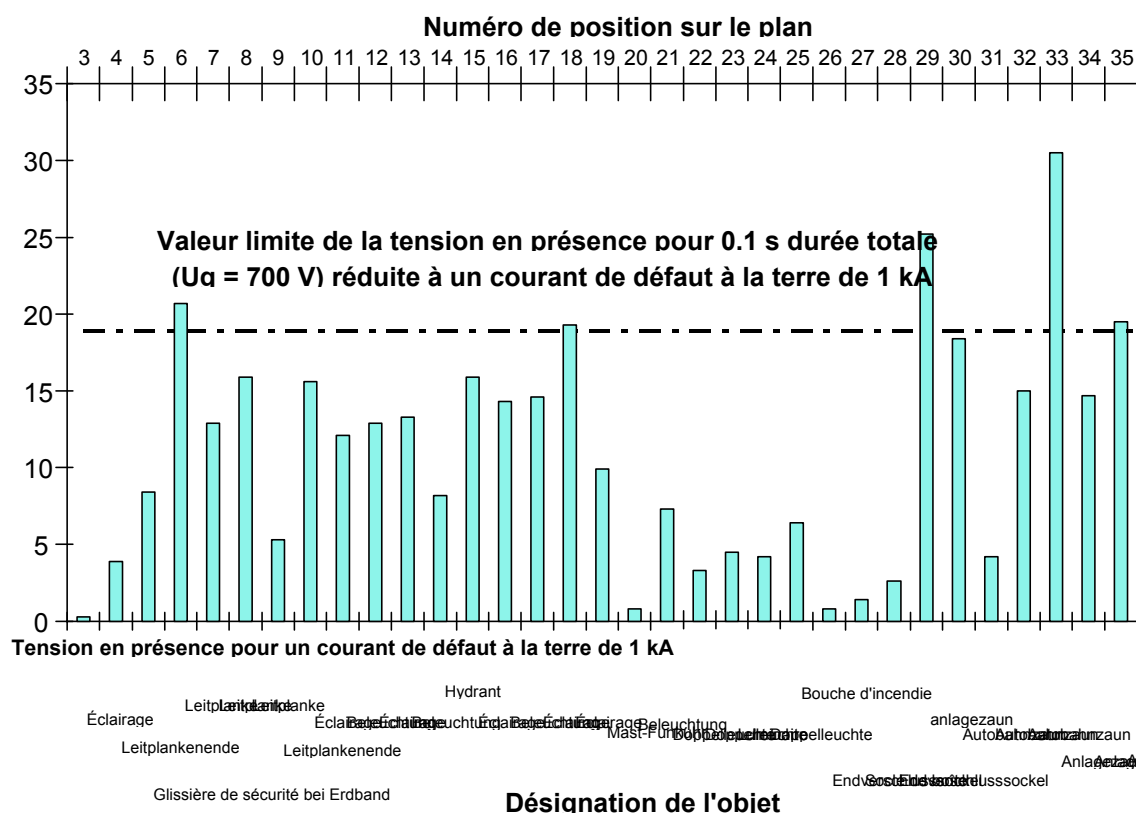


Figure 7 Exemple d'une interprétation des mesures des tensions de contact et de pas aux alentours d'une installation de distribution d'énergie haute tension.

Des remèdes sont proposées pour parer aux hautes tensions de contact, de pas et différentielles.

3 Les règles de l'ASE 3569-1.1985 [1] prescrivent une impédance de mesure entre 2kΩ et 20kΩ.

Pour prévenir les hautes tensions de contact et de pas ou pour en réduire le danger on dispose des mesures suivantes fréquemment appliquées:

- Mise en place d'un revêtement de sol isolant (asphalte, ballast ou gravier).
- Modulation maximale des environs par des électrodes (rubans de terre).
- Mise en place d'une peinture isolante sur les pylônes de lignes électriques aériennes et les parties d'installation mises à la terre.
- Pose de panneaux d'avertissement.
- Réduction de la durée totale de coupure pour défauts à la terre.

7. Détermination de la répartition des courants de terre

La détermination de la répartition des courants de terre sert à en particulier à répondre aux importantes questions ci-dessous:

- 1) Les liaisons de terre sont-elles toutes intactes et exécutées à basse impédance?
- 2) Existe-t-il des câbles d'énergie ou câbles de transmission, qui en cas de défaut à la terre seront chargés par des courants de prise de terre excessivement élevés, ce dont il pourrait résulter des perturbations, des surtensions, voire des surcharges thermiques d'un câble?
- 3) Existe-t-il des liaisons indésirables entre des conducteurs isolés à potentiel zéro et la terre (blindages de câbles ouverts, prise de terre séparée, etc.)?

Pour le contrôle de l'efficacité des systèmes de mises à la terre il est ainsi recommandé de déterminer systématiquement la répartition de courant de tous les conducteurs qui sont en contact avec la terre de l'installation ou qui servent à leur mise à la terre. En font partie en particulier les types de conducteurs figurant au Tableau III.

- Liaisons à des prises de terre ou structures de mises à la terre
- Fils de terre de départ de lignes aériennes
- Gaines mises la terre de câbles de moyenne tension et de haute tension
- Départs en basse tension
- Lignes de signalisation et de commande avec gaines mises à la terre
- Lignes téléphoniques
- Conduites d'eau et de gaz métalliques

Tableau III Récapitulation des types de conducteurs et liaisons à contrôler lors de la détermination de la répartition des courants de mise à la terre

Si les courants de tous les conducteurs figurant au Tableau III sont entièrement saisis en *montant et phase* et s'il n'y a pas d'autres liaisons entre la terre environnante et la terre de l'installation, la somme vectorielle cumulée des courants mesurés produit ainsi le courant de boucle injecté. La répartition des courants de prise de terre pour le cas de court-circuit peut ainsi être déterminée et contrôlée. Mais en règle générale une fraction considérable du courant de prise de terre passe directement dans le sol via le réseau de mise à la terre. Cette fraction n'est normalement pas accessible à une mesure directe et apparaît au bilan des courants de

prise de terre comme reste. Un exemple d'un bilan des courants de défaut à la terre est représenté à la Figure 8.

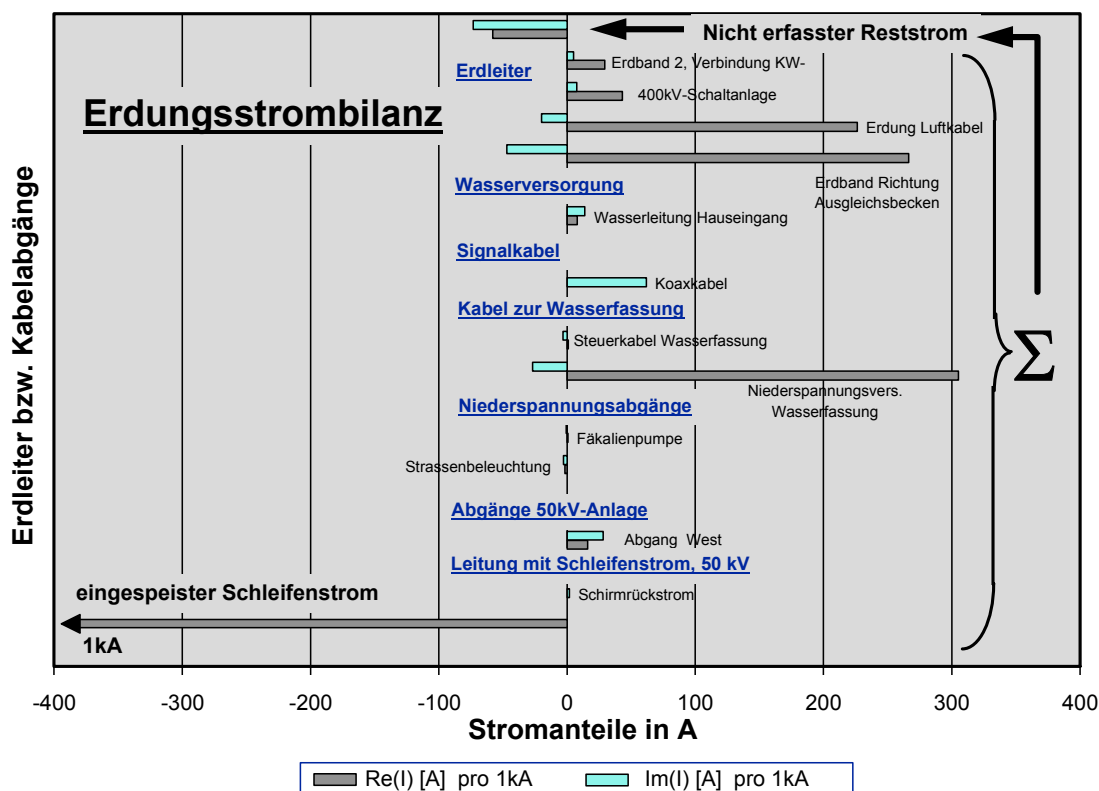


Figure 8 Exemple d'un bilan des courants de prise de terre. Vu la présence de déphasages souvent considérables entre les fractions du courant de prise de terre, le bilan est effectué en distinguant une fraction réelle et une fraction imaginaire.

Pour réaliser la mesure des différentes fractions de courant la CEH utilise des transformateurs de courant à pince appropriés ou des bobines de Rogowski spéciales, de sorte qu'il est aussi possible d'embrasser des conducteurs de forte section (par ex. câbles à haute tension), conduites et pylônes jusqu'à des diamètres de plus de un mètre.

Pour éviter les interférences, les tensions de charge des transformateurs d'intensité doivent être transmises au poste de mesure par des câbles de signalisation blindés et torsadés. Pour supprimer les courants de service à 50 Hz et les courants de traction à $16^{2/3}$ Hz il faut utiliser des filtres coupe-bande comme c'est le cas pour la mesure des tensions de contact et de pas.

La détermination de la relation des phases des fractions du courant à la terre dans les fils de terre et les gaines de câbles exige la transmission jusqu'au lieu de la mesure d'un **signal de référence** du courant de défaut à la terre injecté expérimentalement.

Pour les courtes distances (jusqu'à env. 100 m) le signal de référence du courant de défaut à la terre injecté peut être saisi à l'aide d'un transformateur d'intensité chargé et être transmis au poste de mesure par une ligne bifilaire blindée et torsadée, où l'on détermine le déphasage entre le courant de référence et le courant partiel mesuré.

Pour les grandes distances (jusqu'à env. 1 km) la CEH utilise la **transmission par radio du signal de référence** (voir Figure 9). Lors de la détection du passage par zéro positif du courant de référence une courte impulsion de synchronisation est émise, qui est captée par le poste de mesure. Le déphasage du courant de mesure peut alors être déterminé par comparaison avec le passage par zéro du courant mesuré avec l'impulsion de synchronisation.

L'incertitude de mesurage réalisable lors de la détermination de la relation des phases est de $\pm 5^\circ$. Pour ce faire il faut avoir procédé à un étalonnage de la phase avant la mesure.

Les fractions du courant de prise de terre sont décomposées en une fraction réelle et une fraction imaginaire, cela permettant une **addition vectorielle** des courants partiels. Par fraction réelle on désigne la composante du courant en phase avec le courant de défaut à la terre alimenté; la fraction imaginaire représente alors la composante décalée de 90° par rapport au courant de défaut à la terre.

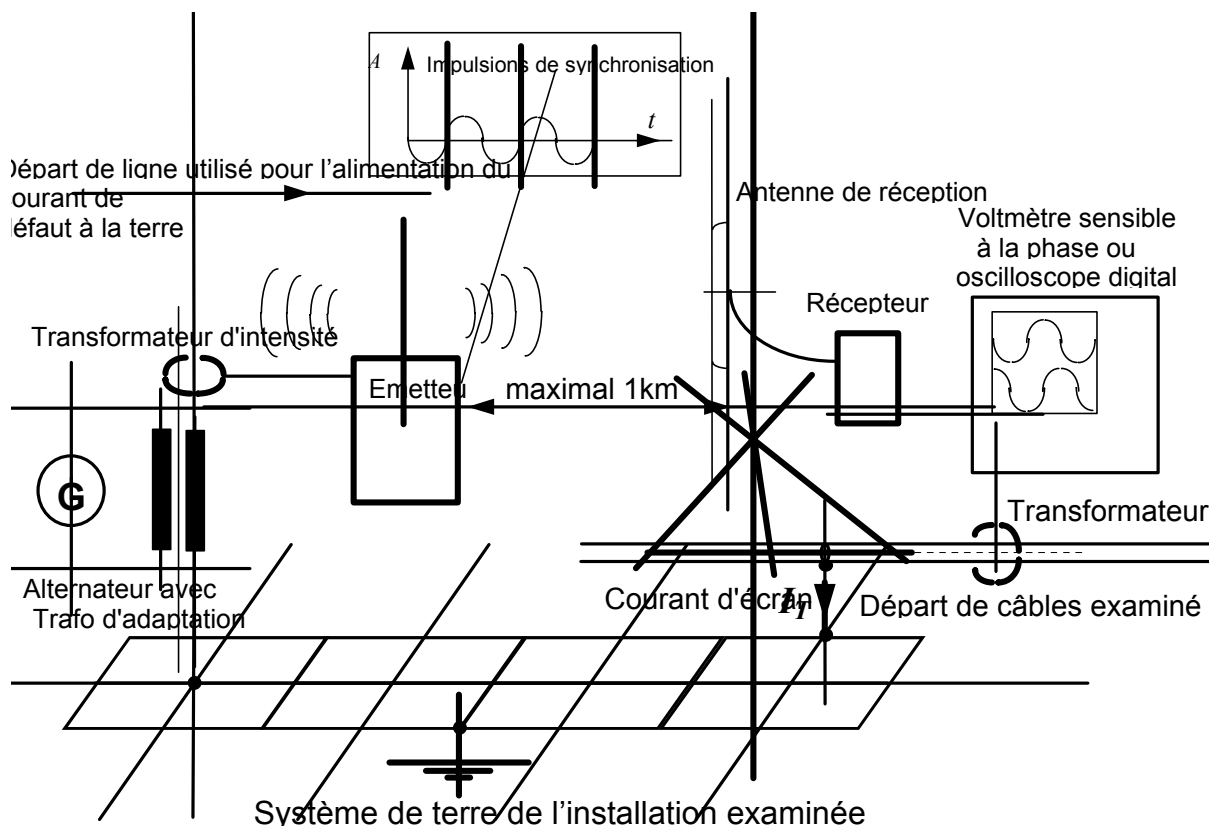


Figure 9 Schéma de principe pour la transmission de signaux de synchronisation pour la mesure des angles de phase entre le courant de boucle injecté (source: alternateur, à gauche) et le courant partiel de prise de terre à mesurer I_T (à droite).

7.1 Mesure des courants dans conducteurs de terre par mesure du champ magnétique

Pour déterminer les fractions du courant à la terre qui s'écoulent par le fil de terre de lignes aériennes, on peut mesurer la densité de flux magnétique B . Cette saisie „indirecte“ des courants du fil de terre I_T a l'avantage que les courants peuvent être déterminés dans les fils de terre souvent difficilement accessibles sans devoir grimper sur les pylônes, au moyen d'une antenne à cadre à partir du sol. Comme le courant injecté se différencie dans la fréquence (~ 70 Hz) du courant de service du réseau, les champs magnétiques que cause le courant de service du réseau sont supprimés par filtration.

Le principe de la mesure „indirecte“ du courant du conducteur de terre est représentée à la Figure 10: Le courant du fil de terre I_T engendre une densité de flux magnétique B , qui induit dans l'antenne à cadre une tension U_{ind} . Après amplification et intégration dans le temps de l'allure de la tension induite on reçoit un signal U_{mes} , dont le comportement est proportionnel au courant s'écoulant dans le fil de terre et inversement proportionnel à la distance verticale d .

L'intégrateur utilisé a été calibré de telle manière que le courant I à mesurer se laisse déterminer très facilement à partir de la relation suivante:

$$I_T [A] = U_{mess} [V] \cdot d [100 m]$$

Si l'on utilise des amplificateurs de capture pour cette méthode de mesure (redresseur synchrone), on peut aussi mesurer par le biais de la densité de flux magnétique du courant du fil de terre très petits dans la plage du milliampère, même si la ligne aérienne est en service.

Figure 10 Schéma de principe pour la détermination d'un courant partiel de prise de terre I_T dans le fil de terre d'une ligne aérienne par une mesure de l'induction magnétique B .

8. Impédance zéro de la ligne utilisée pour l'injection du défaut à la terre

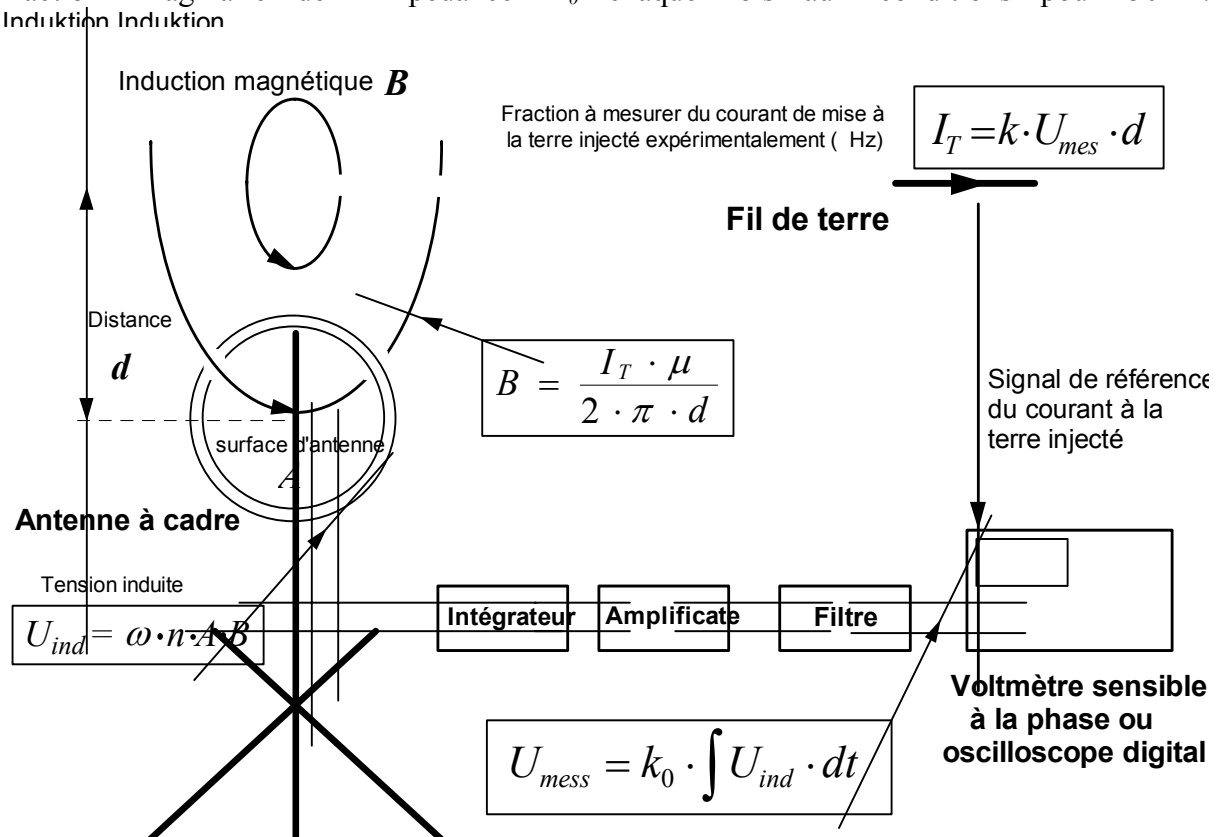
Avec le montage de mesure selon la figure 1 on peut en outre déterminer aussi l'impédance zéro Z_0 d'un système de lignes. Pour ce faire, on détermine le montant et la phase de la tension U_0 efficace et du courant de mesure I_M ou du courant de défaut à la terre I_E . En général l'impédance zéro par phase résulte de la formule:

$$Z_0 = U_0 / I_0$$

Dans le cas d'une injection de défaut à la terre par une ligne monophasée, la composante zéro du courant I_0 correspond au courant de mesure I_M . Si pour une mesure on branche les trois phases en parallèle, on reçoit alors pour $I_M = 3 I_0$:

$$Z_0 = 3U_0 / I_M$$

La CEH utilisant quelque 70 Hz pour les mesures des mises à la terre, il faut ramener la fraction imaginaire de l'impédance Z_0 chaque fois aux conditions pour 50 Hz.



9. Conclusions

Des méthodes de mesure élargies et des appareils de mesure de conception spéciale, en particulier pour la mesure systématique des répartitions des courants de prise de terre, permettent de contrôler et de caractériser, outre les effets du courant de prise de terre dans le sol aussi le courant de prise de terre lié à des conducteurs. La boucle de défaut à la terre établie expérimentalement pour la mesure de la prise de terre permet d'établir à l'aide des méthodes présentées un bilan proprement dit du courant de défaut à la terre, ce qui permet de quantifier toutes les fractions du courant de prise de terre. Cela permet de détecter des défauts et points faibles dans la prise de terre. La répartition du courant donne de plus des renseignements utiles sur les lieux où il faut s'attendre à des tensions de contact et de pas accrues.

Il s'avère nécessaire d'accorder une attention particulière lors de toutes les mesures à la suppression des interférences issues de l'exploitation de l'installation. Il faut s'attendre en particulier à des interférences ohmiques et inductives - dans le cas d'appareils de mesure à haute impédance dans les installations extérieures aussi à des interférences capacitives. Selon les expériences de la CEH l'utilisation de courants d'essai de fréquence différente de celle du réseau a fait ses preuves, des filtres simples permettant d'atteindre des facteurs de suppression très élevés pour les signaux perturbateurs. Une méthode de filtration particulièrement performante à cet effet est le redressement en phase synchronisée avec le courant d'essai (technique Lock-in, amplificateur de capture).

Des problèmes fondamentaux discutés au chapitre il ressort que les mesures des prises de terre ne peuvent prétendre posséder une haute précision, étant donné la marge de manoeuvre considérable dans l'application des méthodes de mesure et l'interprétation. Ce ne peut pas non être le but d'une mesure de prise de terre, de fournir une notation „Suffisant“ ou „Insuffisant“ sur la seule base de quelques grandeurs mesurées. Les difficultés tiennent au fait que dans le cadre d'une mesure de prise de terre il n'est pas possible de simuler de manière suffisamment réaliste un défaut à la terre. La répartition des courants de terre dépend toujours sensiblement du choix de la ligne par laquelle on injecte le courant de défaut à la terre expérimental. Un facteur important dans ce contexte constitue l'effet pelliculaire de courant toujours existant dans le cas de courant alternatif, qui engendre dans le sol une répartition fortement asymétrique des courants et des potentiels.

De ce fait les méthodes de mesure appliquées au contrôle des prises de terre doivent être choisies de sorte telle qu'il en résulte une marge de manoeuvre aussi réduite que possible pour les résultats qui en découlent. Pour améliorer la reproductibilité des résultats de contrôle des prises de terre, il est très souhaitable de disposer d'une standardisation des méthodes de mesure par exemple par la création de recommandations unitaires pour la réalisation des mesures des prises de terre.

Remarque finale

L'auteur remercie tous les collaborateurs de la CEH qui ont apporté leur contribution à ce travail dans le contexte des méthodes de mesures et résultats décrits. Nous remercions particulièrement Monsieur le dr. Aschwanden pour ses suggestions et compléments précieux à cet article.

10. Bibliographie

- [1] Règles de l'ASE 3569-1.1985 "Mise à la terre comme mesure de protection dans les installations électriques à courant fort", Partie 1 - Partie 3.

- [2] Ordonnance sur les installations à courant fort (Ordonnance sur le courant fort) du 30 mars 1994.
- [3] „Erdungen in Starkstromnetzen“; Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke m.b.H. - VDEW, Frankfurt am Main; 3. Auflage, 1992.
- [4] Wiesinger J., Hasse P.: „Handbuch für Blitzschutz und Erdung“, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1982.
- [5] F. Schwab: „Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen“; Bull. SEV/VSE Bd. 71, Nr. 4, (Februar 1980).
- [6] R. Hoffmann: „Neues Messverfahren zur Eliminierung von Fremd- und Störspannungen bei Beeinflussungs- und Erdungsmessungen“; Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91, Heft 22 (1992).
- [7] Koch W.: „Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Berechnung und Ausführung“; Springer Verlag, Zweite Auflage, Berlin, 1955.