

# Technique de mesure des mises à la terre des installations à haute tension, nouveaux procédés

*Reinhold Bräunlich*

Commission d'étude des questions relatives à la haute tension CEH  
Voltastrasse 9, 8044 Zurich

## Résumé

*Cet article décrit la problématique de l'examen expérimental de grandes prises de terre pour des installations à haute tension très diverses, il 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 sur 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“.*

## 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 défaut, des différences de potentiel sur la surface du sol 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 des *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 de ces mesures de prises de terre sont réglées par la législation des *tensions de contact et de pas* maximales qui garantissent *la sécurité des personnes* et réduisent 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 du *point de vue de l'exploitation*. Principalement on trouve des clarifications sur l'évitement *d'influences perturbatrices* et de *surcharges* les lignes et les propres équipements d'exploitation en cas de défaut à la terre. On trouve aussi 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, tel que la *situation du réseau*, 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 le cas de *phénomènes à la fréquence de réseau*. Cela concerne, dans un sens très large, le contrôle de la prise de terre en *cas de défaut à la terre*. La conception de la prise de terre dépend aussi en général des exigences des défauts 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 l'alimente. Le trajet du courant de retour chemine d'une part par l'intermédiaire des prises de terre dans le *sol* de l'installation, et d'autre part par l'intermédiaire de *conducteurs mis à la terre* (câbles de garde des lignes aériennes, 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 dans le sol, il se produit des différences de potentiel que l'on examine par des *mesures de tension* (voir figure 1). La fraction restante du courant de défaut qui s'écoule dans les conducteurs de terre doit être saisie par des *mesures de l'intensité* (voir par ex. courant du câble de garde 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.

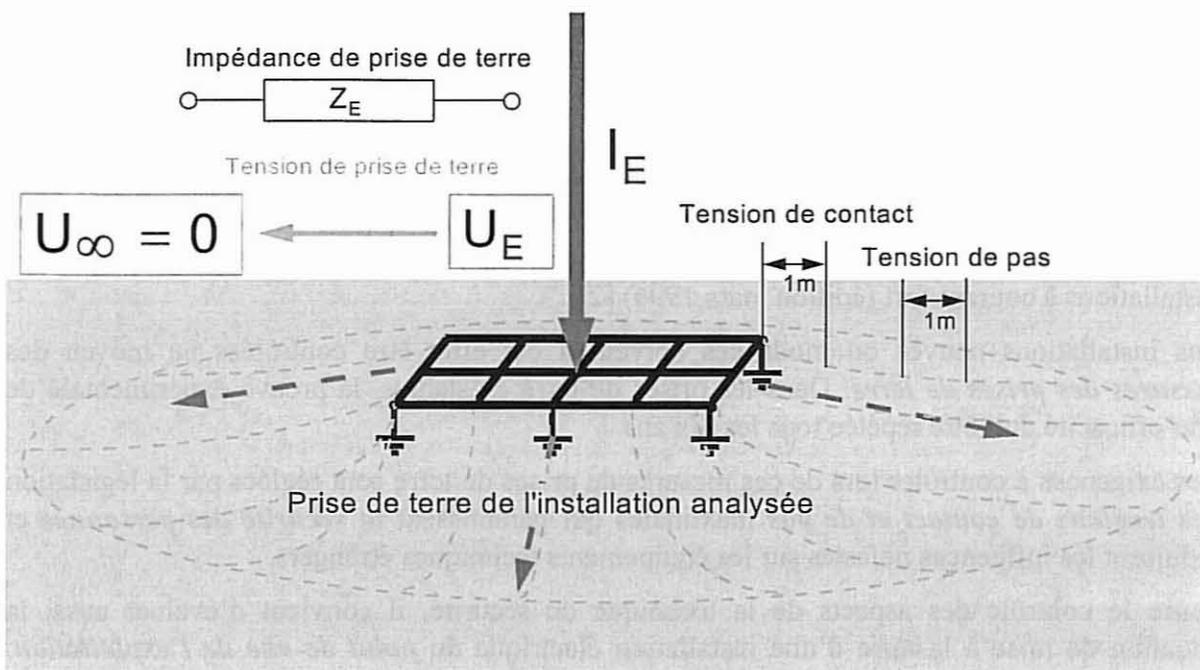


Figure 1 Principe de base d'une mesure de prise de terre: Un courant de défaut à la terre  $I_E$  est injecté dans la prise de terre. Ce courant passe dans le sol et produit dans les alentours de l'installation une augmentation de potentiel en entonnoir  $U_E$ . Dans la zone de transition se produisent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

À l'issue d'une campagne de mesures il convient d'évaluer et de documenter l'efficacité de la prise de terre, 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 en déduire le cas échéant les points faibles de la prise de terre et les 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 basé pour l'essentiel sur la méthode tension - courant: à cet effet on produit un courant de défaut à la terre défini  $I_E$  (quelques ampères jusqu'à quelques centaines d'ampères) à partir d'une source de courant alternatif monophasé ou de courant pulsé. Ce courant est injecté 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 comprises dans 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, on connecte normalement en parallèle les phases des lignes aériennes ou des câbles par l'intermédiaire desquelles se fait l'injection du courant de défaut à la terre.

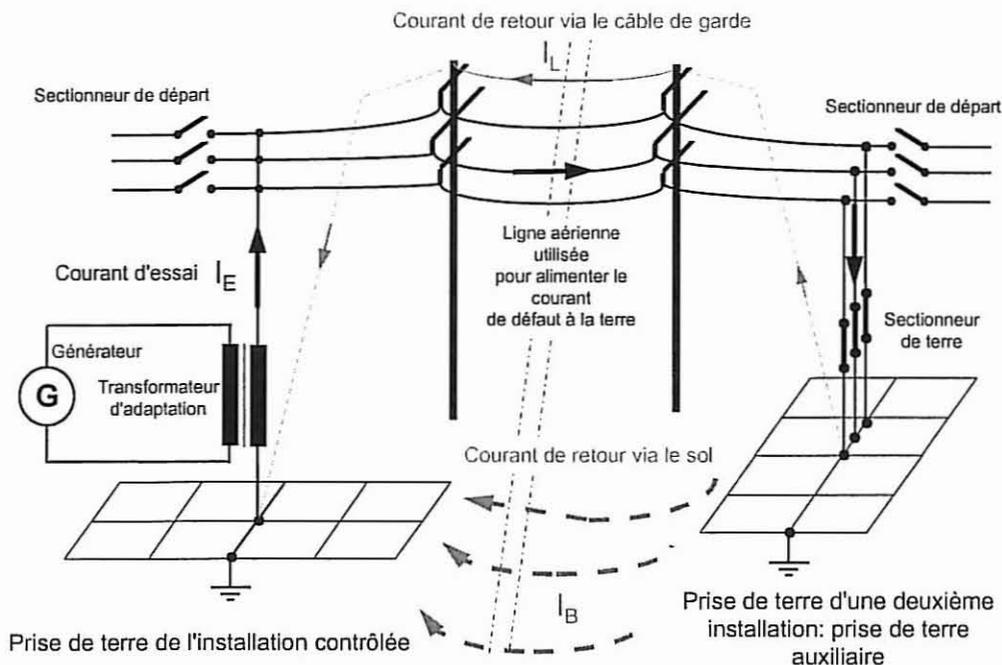


Figure 2 Boucle de défaut à la terre par l'intermédiaire des prises de terre de deux sous-stations utilisant une ligne aérienne. La somme du courant de retour dans le sol  $I_B$  et du courant de retour dans le conducteur de terre  $I_L$  donne le courant de défaut à la terre  $I_E$  injecté expérimentalement.

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'un *entonnoir de potentiel*. Cette tension chute avec la croissance de la distance de la prise de terre. Les objets situés dans cet entonnoir de potentiel se trouvent dans un gradient de potentiel. Ils 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 appropriés<sup>1)</sup>.

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 pas exclusivement par le sol* à la terre de référence. Ils y cheminent pour l'essentiel par l'intermédiaire des câbles de garde 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 de la mesure de prise de terre.

Tous les résultats de mesure (tensions de contact, de pas et courants de lignes 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 de terre unipolaire sur une barre collectrice et dépend de l'état du réseau.

Dans les *grandes prises de terre* pour sous-stations et installations de centrales de production, on a besoin d'une source de courant de quelques dizaines d'ampères jusqu'à quelques centaines d'ampères pour l'injection du courant de défaut à la terre  $I_E$ . La CEH utilise à cet effet un groupe 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 des postes de transformation et pour 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 est réalisée par des piquets plantés dans la 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 incontournables. 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 sa 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. Vers les grandes profondeurs, la conductibilité de la terre diminue pour des raisons géologiques, de ce fait 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 le champ électrique d'une électrode de terre décroissent 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 un 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 terre [ $V/m$ ]

$k$ : 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 de l'installation  $Z_E$  dépendent de la distance de la prise de terre. D'où l'interprétation du potentiel d'entonnoir pour la détermination de la tension de mise à la terre. Dans le cas limite de la propagation en plaine du courant ( $k=1$ ), l'impédance de prise de terre serait 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 au paragraphe 3 sur 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, ils 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 mètres de large le long du conducteur 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  $\delta$  du courant** ou du champ magnétique dans le sol on peut donner des informations quantitatives sur la propagation des courants de terre.

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

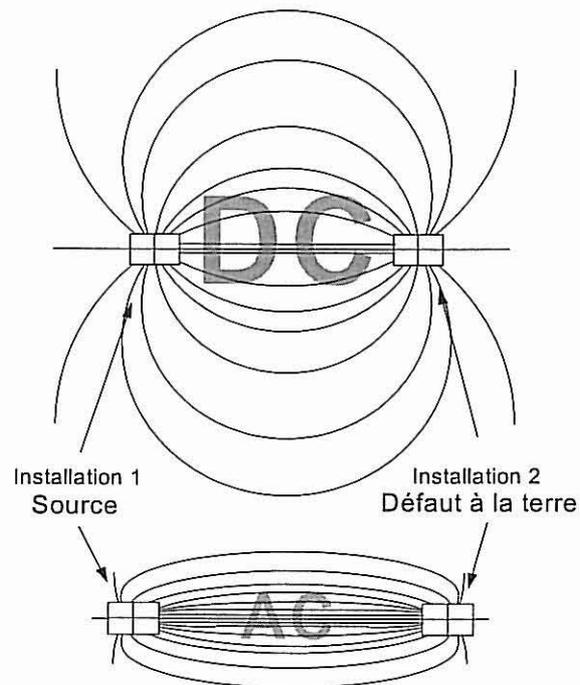
$\delta$ : Profondeur de pénétration du courant de retour via la terre [m]

$r$ : Résistance spécifique du sol [ $\Omega m$ ]

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

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide [ $4\pi \times 10^{-7} Vs/Am$ ]

Pour les résistances spécifiques du sol qui se présentent dans la pratique de  $10 \Omega m$  à  $1000 \Omega m$  à une fréquence du réseau de  $50 Hz$ , il résulte des profondeurs de pénétration  $\delta$  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 **de la direction du profil d'entonnoir de tension mesuré** par rapport à la direction 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, représentation qualitative,  
 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 ligne de l'installation 1. On notera dans le cas du courant alternatif la concentration des lignes de courant de chaque 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  $\delta$ , c'est-à-dire quelques centaines de  $m$ , possèdent de ce fait une répartition des courants de terre qui dépend fortement sur la direction de la ligne alimentant le défaut à la terre. De ce fait, les tensions de contact et de pas mesurées autour de l'installation dépendent fortement du choix de la ligne d'essai alimentant le défaut à la terre. Cette circonstance aggrave en particulier l'appréciation de la situation de mise à la terre lors des mesures de grosses installations (si une seule variante d'alimentation est examinée).

5. A cause des *parties de l'installation délocalisées, mais connectées à la terre*, comme par exemple des poteaux terminaux de départ de lignes aériennes, on ne dispose pas de limitation claire de la prise de terre. Pour cette raison l'impédance de prise de terre n'est pas définissable de manière précise. En outre, le facteur de réduction pour les 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 des mesures des tensions de contact et de pas dépend encore plus de la direction de la ligne alimentant le défaut à la terre à cause des ramifications 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. Une telle mesure de prise de terre, pour des raisons pratiques, n'est faisable qu'exceptionnellement. Mais pour réaliser néanmoins des mesures de prises de terre pour le moins reproductibles, il faudrait avoir une *procédure standard de réalisation de mesures sur les grosses installations*. 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 électriques étant normalement en service pendant les mesures de 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. Si on n'élimine pas la superposition des tensions de perturbation par des mesures appropriées, des falsifications considérables des valeurs de mesure seront facilement générées [3,5].

Outre les signaux de perturbation à la 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.

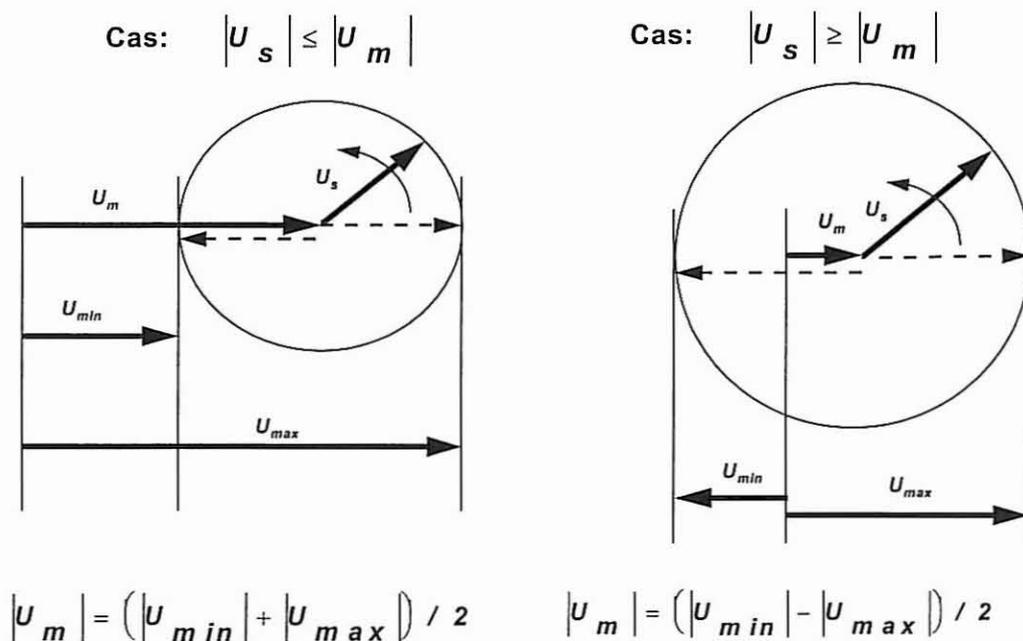


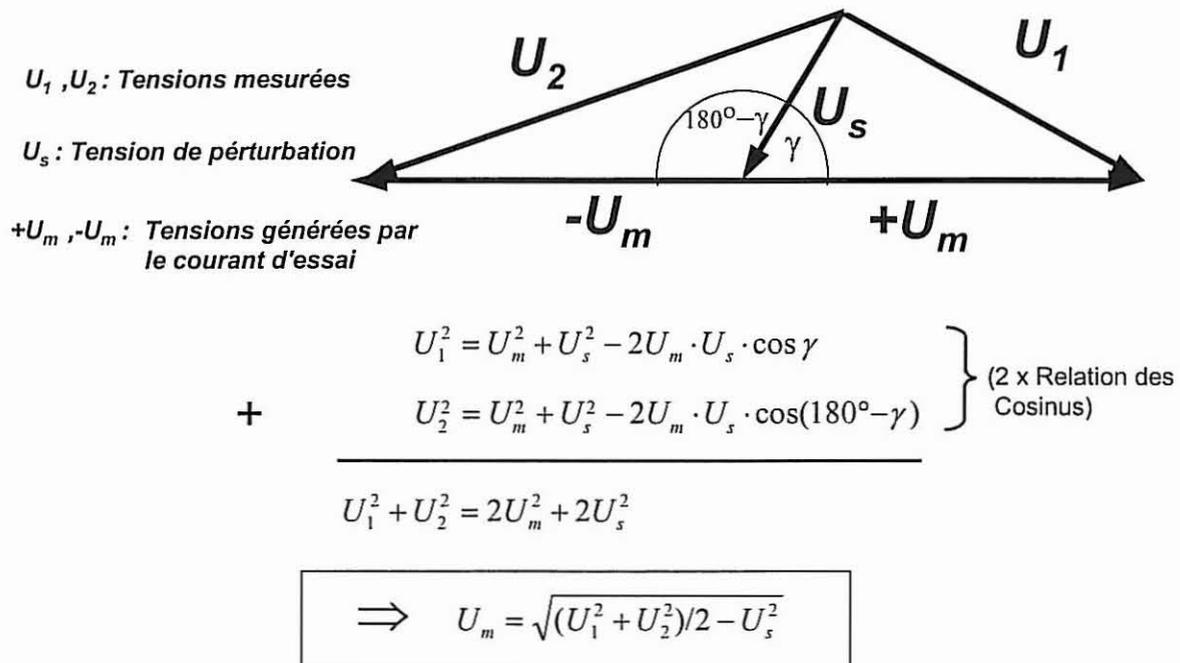
Figure 4 Les diagrammes vectoriels pour la détermination de la tension de mesure  $U_m$  avec la méthode par battement en éliminant les interférences à fréquence de réseau pour le cas où la tension de mesure serait supérieure à la tension de perturbation (à gauche) et pour le cas où la tension de mesure serait 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 la fréquence du réseau que l'on enclenche et déclenche périodiquement. Dans la méthode d'inversion on inverse en plus 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 (mesure de  $U_1$  en cas de polarité positive, de  $U_2$  en cas de polarité négative). 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 doit rester 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 la fréquence du réseau) de la tension de perturbation sans courant d'essai et des tensions mesurées avec courants d'essai positifs et négatifs.

La CEH a collecté par le passé quelques expériences avec les méthodes 1, 2, 4 et 5 (voir Tableau I). L'utilisation d'une fréquence différente de celle du réseau pour le courant d'essai (méthode 5) a largement fait 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 à env. 60-70 Hz. La différence de fréquence entre les courants d'essai et les courants de prise de terre de service permet une séparation simple et efficace. 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 problème des mesures précises dans les grosses installations et avec des 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 de 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 possibles	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 possibles	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 son entonnoir de tension. 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 des 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 contrôle du gradient 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** de l'installation à contrôler. La valeur de l'impédance de prise de terre  $Z_E$  est définie comme le rapport entre la tension d'entonnnoir maximale  $U_E$  (asymptote) et le 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'entonnnoir mesurée de cette manière dépend fortement de la direction 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 la direction **du profil** se trouve **quelque peu à angle droit de la ligne 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 la direction de la mesure du profil.

Ces exigences satisfaites, se manifeste alors relativement tôt (après quelques centaines de mètres) une saturation dans l'allure du potentiel. Ceci est dû en particulier à l'**effet pelliculaire du courant** (à 50 Hz). 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'entonnnoir de tension**, pour que la reproductibilité des mesures puisse être contrôlée.

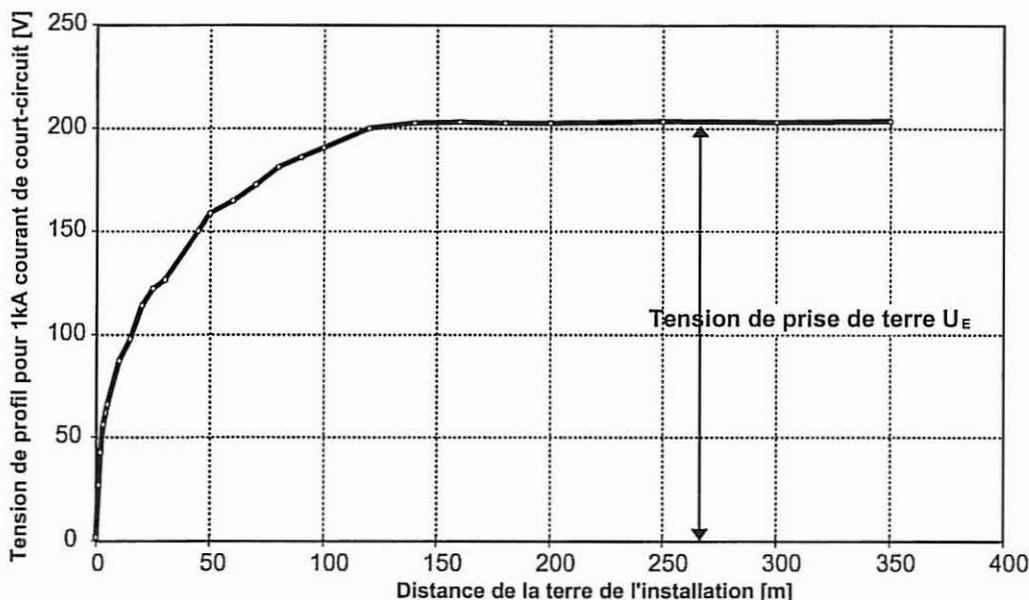


Figure 6 Exemple d'un profil d'entonnnoir de tension d'une installation à haute tension de moyenne taille. Cette allure de profil produit une impédance de prise de terre  $Z_E$  de quelque 205 mΩ.

## 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 est prélevée au moyen de sondes de potentiel ou de câbles de mesure à 1 m de distance de l'objet conducteur considéré. 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 en métal qui peuvent être touchés (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, de pas et différentielles on a développé à la CEH un voltmètre<sup>2</sup> sélectif spécial. L'appareil de mesure contient en option des filtres coupe - bande pour supprimer les interférences à basse fréquence. Ces filtres 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 à 70 Hz et la suppression sélective (env. 40 dB) des perturbations à la fréquence du réseau (50 Hz) ou de composantes perturbatrices du courant de traction ( $16^{2/3}$  Hz) permet en règle générale la saisie fiable même des petits signaux utiles dans la gamme du mV.

Sur chaque point de mesure on relève deux valeurs. En premier, on mesure la tension directement via l'entrée à haute impédance du filtre actif. En second, on branche en parallèle à l'entrée du filtre une impédance de 2 k $\Omega$ <sup>3</sup>. 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 par la résistance du corps humain. Aussi a-t-on recours aux tensions mesurées avec cette *impédance de charge* pour les interprétations.

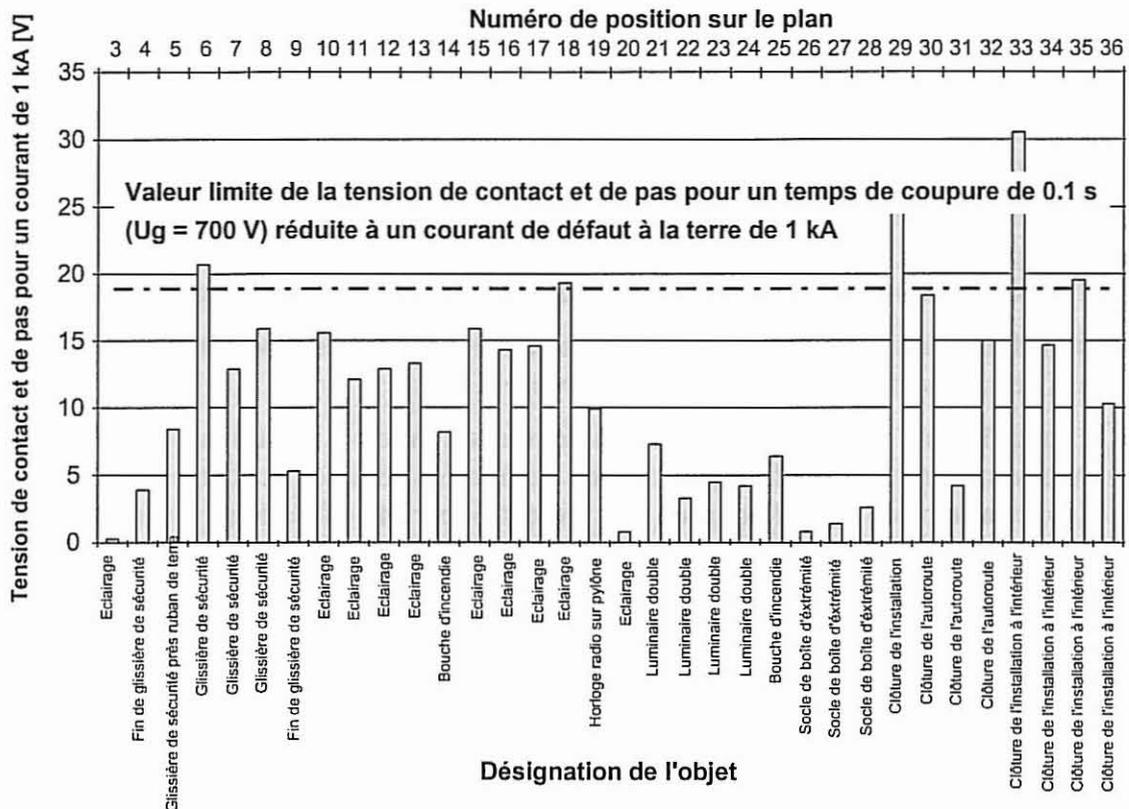
A l'issue des mesures des mises à la terre, il faut évaluer et documenter l'efficacité de la prise de terre et les tensions de contact et de pas qui se manifestent en cas de défaut à la terre.

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

---

2 Une documentation correspondante du voltmètre CEH est disponible.

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



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

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

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).
- Contrôle du gradient de potentiel à l'entour par des électrodes de terre (par ex. par 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 en cas de défauts à la terre.

## 7. Détermination de la répartition des courants de terre

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

- 1) Les liaisons de terre sont-elles toutes intactes et exécuté 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 (écrans 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 du 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 électrodes de terre ou structures de mises à la terre
- Câbles de garde 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 *amplitude 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 la prise de 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.

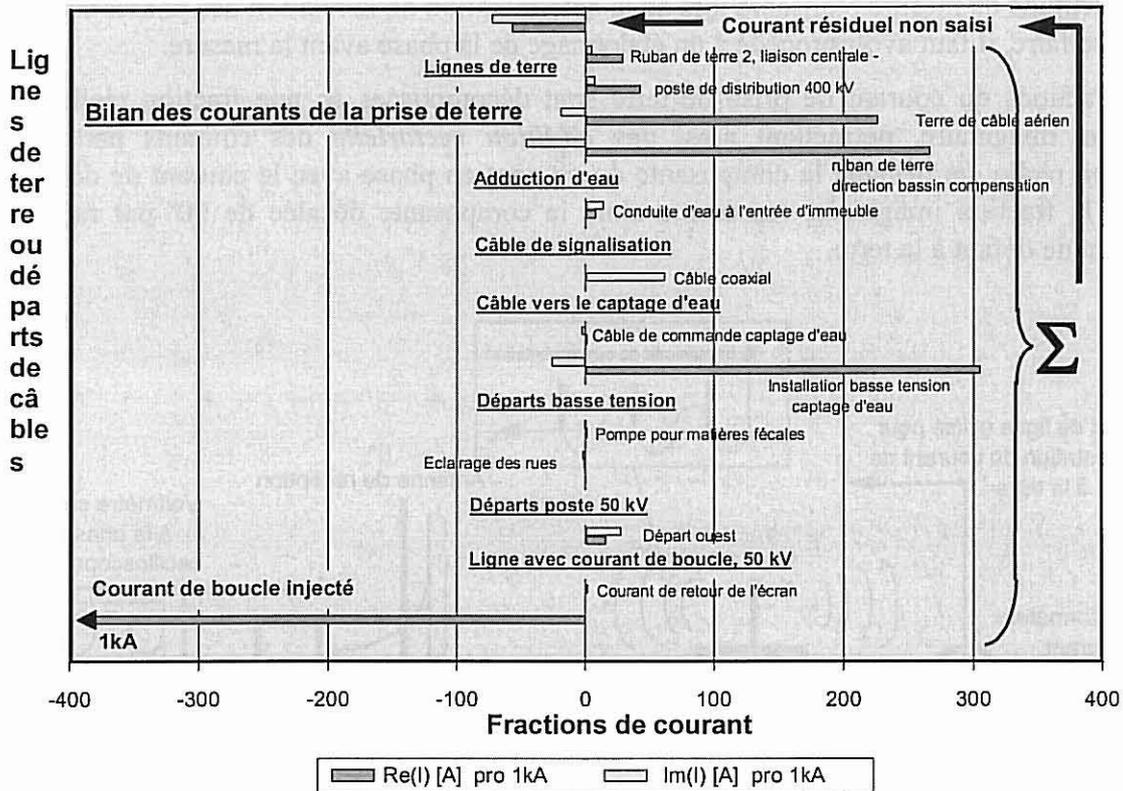


Figure 8 Exemple d'un bilan des courants de prise de terre. Vu la présence de déphasages souvent considérables entre les fractions du courant de prise de terre, le bilan est effectué en distinguant une fraction réelle et une fraction imaginaire.

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.

Pour déterminer la relation des phases des fractions du courant de terre dans les fils de terre et les gaines des câbles, il est nécessaire de transmettre jusque sur le lieu de la mesure un *signal de référence* du courant de défaut à la terre.

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 et être transmis au poste de mesure par une ligne bifilaire torsadée et blindée, là 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 mesure 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, permettant ainsi 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; la fraction imaginaire représente alors la composante décalée de  $90^\circ$  par rapport au courant de défaut à la terre.

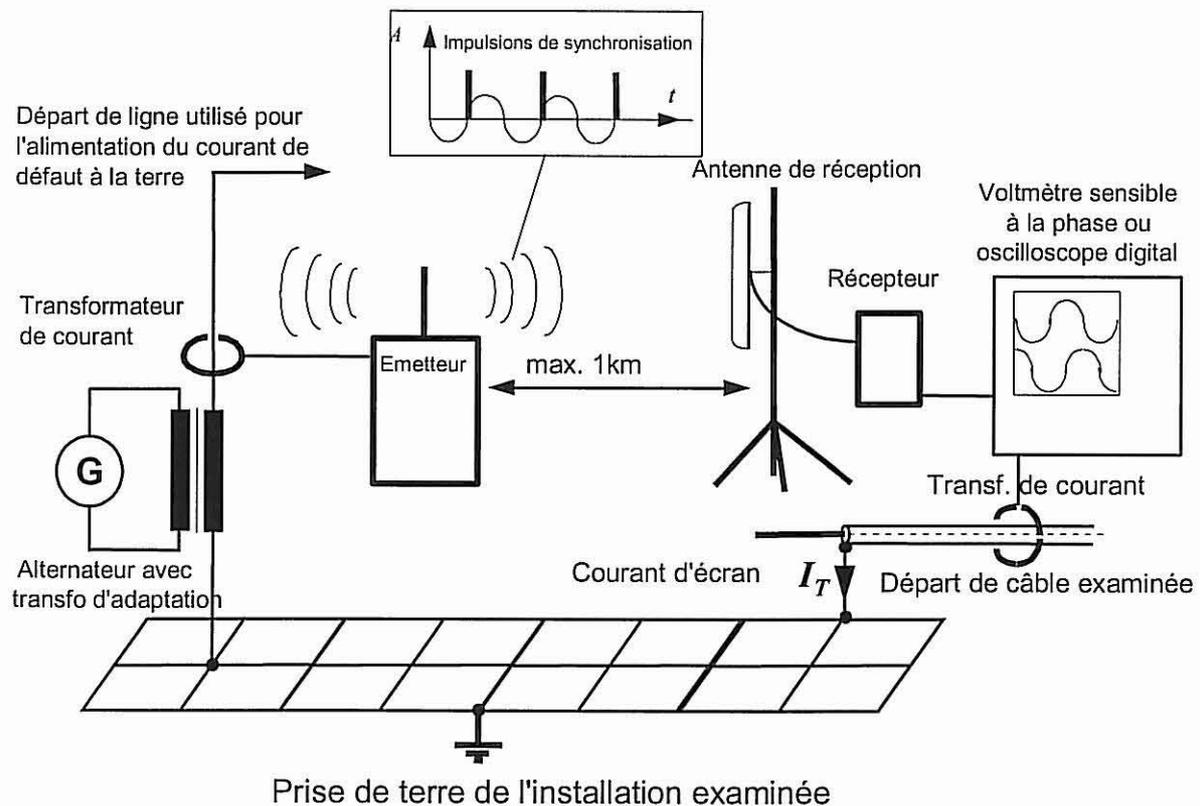


Figure 9 Schéma de principe pour la transmission de signaux de synchronisation pour la mesure des angles de phase entre le courant de boucle injecté (source: alternateur, à gauche) et le courant partiel de prise de terre à mesurer  $I_T$  (à droite).

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

Pour déterminer les fractions du courant à la terre qui s'écoulent par le câble de garde de lignes aériennes, on peut mesurer la densité de flux magnétique  $B$ . Cette saisie „indirecte“ du courants du câble de garde  $I_T$  s'effectue au moyen d'une antenne à cadre à partir du sol. Elle a l'avantage qu'on peut déterminer les courants dans les câbles de garde (souvent difficilement accessibles) sans devoir grimper sur les pylônes. Comme le courant injecté se différencie par sa fréquence ( $\sim 70$  Hz) du courant de service du réseau, les champs magnétiques que cause le courant de service du réseau sont supprimés par filtrage.

Le principe de la mesure „indirecte“ du courant du conducteur de terre est représentée à la Figure 10: Le courant du câble de garde  $I_T$  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 la tension induite on reçoit un signal  $U_{mes}$ , dont le comportement est proportionnel au courant du câble de garde et inversement proportionnel à la distance verticale  $d$ .

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

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

Si 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 des courants du câble de garde très petits dans la plage du milliampère, même si la ligne aérienne est en service.

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

Avec le montage de mesure selon la figure 1, on peut aussi déterminer l'impédance zéro  $Z_0$  d'un système de lignes. Pour ce faire, on détermine la valeur 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 courant 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  $\sim 70$  Hz pour les mesures des prises de terre, il faut chaque fois ramener la fraction imaginaire de l'impédance  $Z_0$  aux conditions du 50 Hz.

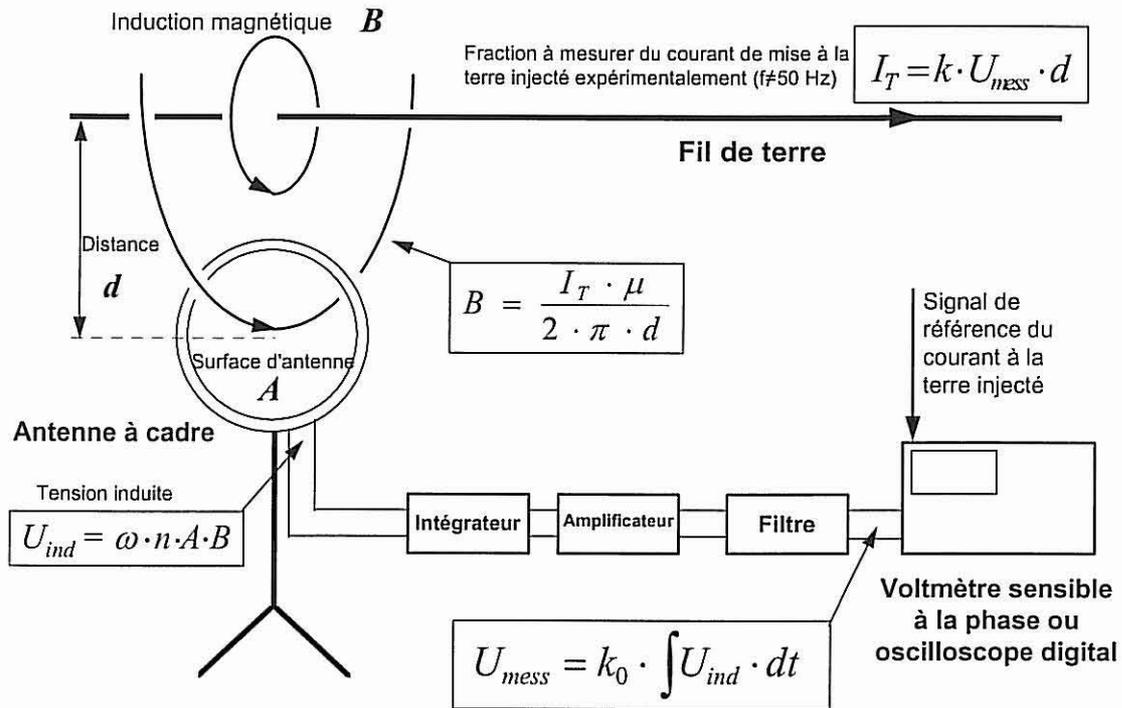


Figure 10 Schéma de principe pour la détermination d'un courant partiel de prise de terre  $I_T$  dans le câble de garde d'une ligne aérienne par une mesure de l'induction magnétique  $B$ .

## 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 du courant de défaut à la terre établie expérimentalement 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, lors de toutes les mesures, d'accorder une attention particulière à la suppression des interférences issues de l'exploitation de l'installation. Il faut s'attendre en particulier à des couplages ohmiques et inductifs, dans le cas d'appareils de mesure à haute impédance dans les installations extérieures et 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 permettent d'atteindre des facteurs de suppression très élevés pour les signaux perturbateurs. Une méthode de filtrage particulièrement performante à cet effet est le redressement en phase synchronisée avec le courant d'essai (technique Lock-in, amplificateur de capture).

Il ressort que les mesures des prises de terre ne peuvent prétendre posséder une grande précision (problèmes fondamentaux discutés au chapitre 3), étant donné la marge de manœuvre considérable dans l'application des méthodes de mesure et l'interprétation. Ce n'est pas non plus 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 est l'effet pelliculaire du courant toujours existant dans le cas de courant alternatif, ce 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 manœuvre 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 mesures, par exemple par la création de recommandations unitaires pour la réalisation de telles mesures.

### 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. En outre nous remercions Monsieur le Dr Th. Heizmann pour la révision du texte français.

## 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.