

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 35 (1944)  
**Heft:** 21

**Artikel:** Conséquences de la mise à la terre du point neutre d'un appareil consommateur, lors de mise à terre accidentelle d'une phase, dans un réseau aérien à haute tension

**Autor:** Golay, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056996>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.01.2025

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

## Conséquences de la mise à la terre du point neutre d'un appareil consommateur, lors de mise à terre accidentelle d'une phase, dans un réseau aérien à haute tension

Par R. Golay, Lausanne

621.316.99:621.316.1

La présente étude a été motivée par de nombreuses perturbations enregistrées sur le réseau à 13 kV de la Compagnie Vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe, perturbations provoquées par une chaudière à électrodes, dont le point neutre, qui est la cuve de la chaudière, se trouve en liaison directe avec la terre. En traitant cette question d'une manière assez générale, nous pensons qu'elle est de nature à intéresser de nombreux lecteurs de ce Bulletin, en particulier les exploitants, car elle peut devenir d'actualité pour eux, une fois ou l'autre.

Die vorliegende Arbeit entstand auf Grund zahlreicher Betriebsstörungen im 13-kV-Netz der Compagnie Vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe. Diese Störungen wurden von einem Elektrodendampfkessel, dessen Sternpunkt direkt mit Erde verbunden ist, hervorgerufen. Wir denken, dass eine allgemeine Behandlung dieses Problems die Leser des Bulletin und unter ihnen besonders die Betriebsleute interessieren mag, weil diese Frage für sie einmal gewisse Bedeutung erlangen kann.

### Introduction et délimitation du problème

Nous considérons un réseau à haute tension (pratiquement il s'agit de tensions de 3 à 20 kV) alimenté par une station ou une sous-station, représentée sur la fig. 1 par un transformateur triphasé étoile-étoile, débitant sur un jeu de barres, d'où sont issues les différentes lignes du réseau. La ligne *b* alimente un appareil consommateur *B* dont le point neutre est relié directement à la terre, et en outre, un ensemble de consommateurs *H*. La ligne *g* dessert un ensemble de consommateurs *D*. Tous les autres départs sont représentés par la ligne *f*, desservant un complexe de consommateurs *F*. L'ensemble des complexes *D*, *F*, *H*, y compris les sta-

courants capacitifs entre les phases 2 et 3 d'une part et la phase 1 d'autre part, en passant par le sol et le défaut *G*. L'exploitation peut en général être poursuivie, sauf dans les réseaux très étendus où ces courants capacitifs deviennent importants, et dans le cas de terre par arc, à cause de l'aggravation immédiate du défaut (rupture du conducteur, allumage du poteau...) ou de l'amorçage d'un court-circuit entre phases.

b) Réseau avec bobine d'extinction. Comme dans le cas du neutre isolé, des courants capacitifs circulent entre les phases 2 et 3 d'une part, et la phase 1 d'autre part, par le défaut; mais ces courants sont sensiblement compensés par le courant inductif qui s'établit dans le circuit constitué par la bobine, la phase 1, le défaut *G* et le sol. Le courant résiduel subsistant au défaut est alors minimale, et permet de continuer l'exploitation pendant la recherche de la défectuosité.

c) Réseau avec neutre directement à la terre. La phase 1 du système *A* est en court-circuit à la terre. Le courant qui circule dans cette phase, entre le défaut et le neutre, produit la mise hors-service de la ligne *g* par déclenchement de son disjoncteur.

L'existence de l'appareil consommateur *B* dont le neutre est à la terre, modifie les conditions précédentes en introduisant, primo, des courants supplémentaires passant de la ligne *b* à la ligne *g* par la mise à terre de l'appareil *B*, le sol et le défaut *G*, et secundo, des courants de circulation par le neutre de *B* et le neutre du système *A*, lorsque celui-ci n'est pas isolé. Dans les réseaux dont le neutre est à la terre, ces courants supplémentaires ne présentent guère d'inconvénient. Du fait que le potentiel des phases 2 et 3, par rapport au sol, ne peut s'élever, aucune surintensité ne s'établit dans la ligne *b*. L'appareil *B* fonctionne sur 2 phases pendant un instant, jusqu'à ce que le défaut soit éliminé par la mise hors-service de la ligne *g*. Le cas des réseaux avec neutre à la terre ne présente donc pas d'intérêt pour cette étude. En conséquence, la suite ne concerne que les réseaux à neutre isolé ou à bobine d'extinction, dans lesquels les lignes *b* et *g* peuvent être le siège de surintensités, qui dans nombre de cas produisent la disjonction de ces 2 lignes. Si certaines mesures de protection ne sont pas prises, la mise à la terre du neutre du consommateur *B* a donc pour conséquence possible, le déclenchement intempestif des lignes *b* et *g*, pour les

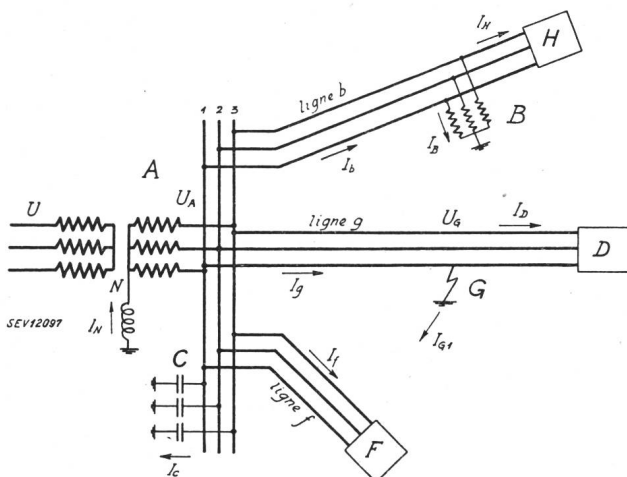


Fig. 1.

Schéma du réseau,

avec consommateur *B* dont le neutre est à la terre, et avec mise à terre accidentelle de la phase 1 en *G*.

tions transformatrices intermédiaires éventuelles, n'a aucun point neutre relié à la terre du côté haute tension. Pour ce qui concerne le neutre du système *A*, nous considérons les trois cas les plus fréquents:

- neutre isolé,
- neutre en liaison avec la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'extinction,
- neutre directement à la terre.

Supposons qu'une mise à terre accidentelle se produise en *G*, sur la phase 1 de la ligne *g*, et rappelons brièvement ce qui se passe, si l'on fait abstraction du consommateur *B*:

a) Réseau avec neutre isolé. Les phases 2 et 3 du réseau sont alors soumises à une élévation de potentiel par rapport au sol, qui fait circuler des

réseaux avec neutre isolé ou avec bobine d'extinction. Ces interruptions de courant sont absolument inadmissibles pour les abonnés des complexes *D* et *H*.

Afin de se rendre compte plus exactement de la répartition des courants dans le réseau, ainsi que de l'importance des surintensités, nous allons calculer les courants des lignes *b* et *g*, avant et après l'apparition de la mise à terre accidentelle en *G*.

**Calcul des courants avant l'apparition du défaut**

Nous utilisons les notations suivantes:

$U_1, U_2, U_3$  tensions simples, côté primaire du transformateur *A*, rapportées au secondaire.

$$U_1 = U, U_2 = a^2 U, U_3 = a U$$

avec

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, j = \sqrt{-1}.$$

$U_{An}$  tension simple du système *A*, côté secondaire.

$I_{bn}$  courant dans la ligne *b*, entre *A* et *B*.

$I_{gn}$  courant dans la ligne *g*.

$I_{fn}$  courant dans la ligne *f*.

$I_{Bn}$  courant absorbé par le consommateur *B*.

$I_{Hn}$  courant absorbé par l'ensemble des abonnés *H*. (Il s'agit des valeurs efficaces vectorielles de tensions et courants sinusoïdaux.)

$Z_b$  impédance de phase de la ligne *b*, entre *A* et *B*.

$Z_g$  impédance de phase de la ligne *g*, entre *A* et *G*.

$Z_B$  impédance de phase du consommateur *B*, y compris la dérivation qui le raccorde à la ligne *b*.

$Z_H$  impédance de phase résultante du groupe *H*, y compris la ligne depuis le point *B*.

$Z_D$  impédance de phase résultante du groupe *D*, y compris la ligne depuis le point *G*.

$Z_F$  impédance de phase résultante du groupe *F*, y compris la ligne *f*.

$Z_A$  impédance de court-circuit par phase du transformateur *A*, rapportée à la tension secondaire. (Ces impédances sont bien entendu des valeurs complexes.)

En négligeant les courants capacitifs, qui sont faibles pour les tensions de service considérées, ainsi que le courant à vide du transformateur, nous avons les relations vectorielles:

$$U_{An} = U - Z_A (I_{bn} + I_{gn} + I_{fn}).$$

$$U_{An} = Z_b (I_{Bn} + I_{Hn}) + Z_H \cdot I_{Hn}$$

$$U_{An} = Z_b (I_{Bn} + I_{Hn}) + Z_B \cdot I_{Bn}$$

$$U_{An} = (Z_g + Z_D) \cdot I_{gn}$$

$$U_{An} = Z_F \cdot I_{fn}$$

$$I_{bn} = I_{Bn} + I_{Hn}$$

d'où l'on déduit facilement l'expression de la tension simple  $U_{An}$  du système *A*, et des courants  $I_{bn}, I_{gn}, I_{fn}$ :

$$U_{An} = \frac{U}{\Delta}$$

$$I_{bn} = \frac{U}{\left[ Z_b + \frac{1}{\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_B}} \right] \cdot \Delta}$$

$$I_{gn} = \frac{U}{(Z_g + Z_D) \cdot \Delta}$$

$$I_{fn} = \frac{U}{Z_F \cdot \Delta}$$

avec

$$\Delta = 1 + Z_A \left[ \frac{1}{Z_b + \frac{1}{\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_B}}} + \frac{1}{Z_g + Z_D} + \frac{1}{Z_F} \right]$$

**Calcul des courants après l'apparition du défaut**

L'apparition de la mise à terre accidentelle supprime la symétrie du système de charge, à cause de la circulation de courants par le sol. Il est connu

Valeurs efficaces vectorielles	Valeurs totales	Syst. direct	Syst. inverse	Syst. homopol.
Tension simple côté primaire du transformateur <i>A</i> , rapportée au secondaire . . . . .	$U_1 U_2 U_3$	$U$	—	—
Tension simple côté secondaire du transformateur <i>A</i> . . . . .	$U_{A1} U_{A2} U_{A3}$	$U'_A$	$U''_A$	$U^0_A$
Tension contre terre du point neutre du transformateur <i>A</i> . . . . .	—	—	—	$U_N$
Tension entre phase et terre en <i>G</i> . . . . .	$U_{G1} U_{G2} U_{G3}$	$U'_G$	$U''_G$	$U^0_G$
Courant dans la ligne <i>b</i> , entre <i>A</i> et <i>B</i> . . . . .	$I_{b1} I_{b2} I_{b3}$	$I'_b$	$I''_b$	$I^0_b$
Courant dans la ligne <i>g</i> , entre <i>A</i> et <i>G</i> . . . . .	$I_{g1} I_{g2} I_{g3}$	$I'_g$	$I''_g$	$I^0_g$
Courant dans la ligne <i>f</i> . . . . .	$I_{f1} I_{f2} I_{f3}$	$I'_f$	$I''_f$	—
Courant absorbé par le consommateur <i>B</i> . . . . .	$I_{B1} I_{B2} I_{B3}$	$I'_B$	$I''_B$	$I^0_B$
Courant absorbé par le groupe <i>H</i> . . . . .	$I_{H1} I_{H2} I_{H3}$	$I'_H$	$I''_H$	—
Courant absorbé par le groupe <i>D</i> . . . . .	$I_{D1} I_{D2} I_{D3}$	$I'_D$	$I''_D$	—
Courant au défaut <i>G</i> . . . . .	$I_{G1} I_{G2} I_{G3}$	$I'_G$	$I''_G$	$I^0_G$
Courant dans la bobine d'extinction ou le neutre de <i>A</i> . . . . .	$I_N$	—	—	$I_N$
Impédance de court-circuit par phase du transformateur <i>A</i> , rapportée au côté secondaire	—	$Z'_A$	$Z''_A$	—
Impédance de court-circuit par phase de l'enroulement secondaire du transformateur <i>A</i>	—	—	—	$Z^0_A$
Impédance de phase de la ligne <i>b</i> , de <i>A</i> à <i>B</i> . . . . .	—	$Z'_b$	$Z''_b$	$Z^0_b$
Impédance de phase de la ligne <i>g</i> , de <i>A</i> à <i>G</i> . . . . .	—	$Z'_g$	$Z''_g$	$Z^0_g$
Impédance de phase du consommateur <i>B</i> , y compris la dérivation . . . . .	—	$Z'_B$	$Z''_B$	$Z^0_B$
Impédance de phase du groupe <i>H</i> , y compris la ligne depuis <i>B</i> . . . . .	—	$Z'_H$	$Z''_H$	—
Impédance de phase du groupe <i>D</i> , y compris la ligne depuis <i>G</i> . . . . .	—	$Z'_D$	$Z''_D$	—
Impédance de phase du groupe <i>F</i> , y compris la ligne <i>f</i> . . . . .	—	$Z'_F$	$Z''_F$	—
Résistance du défaut <i>G</i> . . . . .	$R_d$	—	—	—
Impédance de la bobine d'extinction, y compris la résistance de la mise à terre . . . . .	—	—	—	$Z_N$
Pulsation des tensions et courants . . . . .	$\omega$	—	—	—
Capacité totale du réseau, contre terre et par phase . . . . .	$C$	—	—	—
Courant capacitif total du réseau, contre terre et par phase	$I_{C1} I_{C2} I_{C3}$	—	—	$I^0_C$

que tout système triphasé asymétrique peut être décomposé en 3 systèmes symétriques: le système direct, le système inverse, le système résiduel ou homopolaire.

Dans les notations, nous prenons l'indice (') pour le système direct, l'indice (") pour le système inverse et l'indice (°) pour le système homopolaire. Nous adoptons les notations ci-dessus, par analogie avec le calcul précédent, en admettant que le complexe «centrales et lignes de transport», qui alimente la station A, est suffisamment puissant, pour permettre de considérer le système symétrique des tensions primaires  $U_1, U_2, U_3$ , comme non influencé par l'apparition du défaut.

Le sens des courants est celui indiqué par les flèches de la fig. 1.

Comme précédemment, nous négligeons le courant à vide du transformateur A et les courants capacitifs symétriques entre phases. Au point de vue capacitif contre terre, nous assimilons l'ensemble du réseau à 3 condensateurs de capacité C chacun, branchés sur les barres du poste A.

Les équations vectorielles relatives à chacun des trois systèmes sont dans nos hypothèses:

Pour le système direct

$$\left. \begin{aligned} U &= U'_A + Z'_A (I'_b + I'_g + I'_f) \\ I'_b &= I'_B + I'_H; \quad I'_g = I'_D + I'_G \\ U'_A &= Z'_b (I'_B + I'_H) + Z'_H I'_H \\ U'_A &= Z'_b (I'_B + I'_H) + Z'_B \cdot I'_B \\ U'_A &= Z'_g (I'_D + I'_G) + Z'_D I'_D \\ U'_A &= Z'_F \cdot I'_f \\ U'_G &= U'_A - Z'_g (I'_D + I'_G) \end{aligned} \right\} (1)$$

Pour le système inverse

$$\left. \begin{aligned} 0 &= U''_A + Z''_A (I''_b + I''_g + I''_f) \\ I''_b &= I''_B + I''_H; \quad I''_g = I''_D + I''_G \\ U''_A &= Z''_b (I''_B + I''_H) + Z''_H I''_H \\ U''_A &= Z''_b (I''_B + I''_H) + Z''_B \cdot I''_B \\ U''_A &= Z''_g (I''_D + I''_G) + Z''_D I''_D \\ U''_A &= Z''_F \cdot I''_f \\ U''_G &= U''_A - Z''_g (I''_D + I''_G) \end{aligned} \right\} (2)$$

Pour le système homopolaire

$$\left. \begin{aligned} U_N &= U^0_A + Z^0_A (I^0_b + I^0_g + I^0_c) \\ U_N &= -Z_N I_N \\ U^0_A &= (Z^0_b + Z^0_B) I^0_B \\ U^0_A &= Z^0_g \cdot I^0_G + U^0_G \\ U^0_A &= \frac{I^0_c}{j \omega C} \end{aligned} \right\} (3)$$

La résistance de la mise à la terre au point B est supposée assez minime pour être négligée.

Au défaut, les conditions

$$U_{G1} = R_d I_{G1}; \quad I_{G2} = I_{G3} = 0 \quad (4)$$

doivent être satisfaites. En outre, on a pour les courants qui circulent par le sol:

$$3 I^0_B + I_{G1} + 3 I^0_c - I_N = 0 \quad (5)$$

Les conditions (4) se traduisent par

$$\left. \begin{aligned} U^0_G + U^0_b + U^0_g &= R_d (I^0_G + I^0_b + I^0_g) \\ I^0_G + a^2 I^0_b + a I^0_g &= 0 \\ I^0_G + a I^0_b + a^2 I^0_g &= 0 \end{aligned} \right\} (4')$$

relations qui donnent

$$I^0_G = I^0_b = I^0_g \quad I_{G1} = 3 I^0_G \quad (6)$$

Des équations (1) du système direct on déduit immédiatement:

$$\left. \begin{aligned} I'_B &= \frac{U'_A \cdot Z'_H}{Z'_b Z'_B + Z'_H Z'_B + Z'_b Z'_H} \\ I'_H &= \frac{U'_A \cdot Z'_B}{Z'_b Z'_B + Z'_H Z'_B + Z'_b Z'_H} \\ I'_D &= \frac{U'_A}{Z'_g + Z'_D} - \frac{Z'_g \cdot I'_G}{Z'_g + Z'_D} \\ U'_A &= \frac{U}{\Delta'} - \frac{Z'_A}{\Delta'} \cdot \frac{Z'_D \cdot I'_G}{Z'_g + Z'_D} \\ U'_G &= \frac{Z'_D}{Z'_g + Z'_D} \left[ \frac{U}{\Delta'} - I'_G \left( \frac{Z'_A}{\Delta'} \cdot \frac{Z'_D}{Z'_g + Z'_D} + Z'_g \right) \right] \end{aligned} \right\} (7)$$

Avec

$$\Delta' = 1 + Z'_A \left[ \frac{1}{Z'_b + \frac{1}{\frac{1}{Z'_H} + \frac{1}{Z'_B}}} + \frac{1}{Z'_g + Z'_D} + \frac{1}{Z'_F} \right]$$

De même les équations du système inverse donnent

$$\left. \begin{aligned} I''_B &= \frac{U''_A \cdot Z''_H}{Z''_b Z''_B + Z''_H Z''_B + Z''_b Z''_H} \\ I''_H &= \frac{U''_A \cdot Z''_B}{Z''_b Z''_B + Z''_H Z''_B + Z''_b Z''_H} \\ I''_D &= \frac{U''_A}{Z''_g + Z''_D} - \frac{Z''_g \cdot I''_G}{Z''_g + Z''_D} \\ U''_A &= -\frac{Z''_A}{\Delta''} \cdot \frac{Z''_D \cdot I''_G}{Z''_g + Z''_D} \\ U''_G &= -I''_G \left( \frac{Z''_A}{\Delta''} \cdot \frac{Z''_D}{Z''_g + Z''_D} + Z''_g \right) \cdot \frac{Z''_D}{Z''_g + Z''_D} \end{aligned} \right\} (8)$$

Avec

$$\Delta'' = 1 + Z''_A \left[ \frac{1}{Z''_b + \frac{1}{\frac{1}{Z''_H} + \frac{1}{Z''_B}}} + \frac{1}{Z''_g + Z''_D} + \frac{1}{Z''_F} \right]$$

Les relations (3) du système homopolaire permettent de tirer:

$$\left. \begin{aligned} I_B^0 &= \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \\ I_N &= -\frac{U_A^0}{Z_N} \left( \frac{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} + j\omega C Z_A^0 \right) - \frac{Z_A^0}{Z_N} \cdot I_G^0 \\ U_G^0 &= U_A^0 - Z_g^0 \cdot I_G^0 \end{aligned} \right\} (9)$$

En tenant compte des expressions de  $U_G^0$ ,  $U_G'$ ,  $U_G''$  données par (7) (8) (9), et de la relation (6), la condition (4')

$$U_G^0 + U_G' + U_G'' = R_d (I_G^0 + I_G' + I_G'')$$

devient

$$\begin{aligned} U_A^0 - I_G^0 \left[ \frac{Z_b^0}{Z_g^0 + Z_D^0} \left( \frac{Z_A^0}{\Delta'} \cdot \frac{Z_b^0}{Z_g^0 + Z_D^0} + Z_g^0 \right) + \right. \\ \left. + \frac{Z_b''}{Z_g'' + Z_D''} \left( \frac{Z_A''}{\Delta''} \cdot \frac{Z_b''}{Z_g'' + Z_D''} + Z_g'' \right) + 3R_d + Z_g^0 \right] \\ = -\frac{Z_b^0}{Z_g^0 + Z_D^0} \cdot \frac{U}{\Delta'} \end{aligned} \quad (10)$$

L'introduction des valeurs de  $I_B^0$ ,  $I_{G1}$ ,  $I_c^0$  et  $I_N$ , données par (3), (6) et (9), dans la relation (5)

$$3 I_B^0 + I_{G1} + 3 I_c^0 - I_N = 0$$

donne après quelques calculs:

$$\begin{aligned} \frac{U_A^0}{Z_N} \left[ \frac{3 Z_N + Z_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} + 3j\omega C \left( Z_N + \frac{Z_A^0}{3} \right) + 1 \right] = \\ = -I_G^0 \left( 3 + \frac{Z_A^0}{Z_N} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

L'élimination de  $U_A^0$  entre les relations (10) et (11) permet de trouver l'expression de  $I_G^0 = I_G' = I_G''$  et du courant au défaut  $I_{G1} = 3 I_G^0$ .

$$\begin{aligned} I_G^0 = \frac{\frac{U}{\Delta'} \left( \frac{Z_b^0}{Z_g^0 + Z_D^0} \right)}{\frac{3 Z_N + Z_A^0}{j\omega C Z_N \Delta'''} + \frac{Z_g^0 Z_D^0}{Z_g^0 + Z_D^0} + \frac{Z_g'' Z_D''}{Z_g'' + Z_D''} + Z_g^0 + 3R_d} \\ + \frac{Z_A^0}{\Delta'} \left( \frac{Z_b^0}{Z_g^0 + Z_D^0} \right)^2 + \frac{Z_A''}{\Delta''} \left( \frac{Z_b''}{Z_g'' + Z_D''} \right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Avec

$$\Delta''' = \frac{3 Z_N + Z_A^0}{j\omega C Z_N (Z_b^0 + Z_B^0)} + \frac{1}{j\omega C Z_N} + 3 \left( 1 + \frac{Z_A^0}{3 Z_N} \right) \quad (13)$$

$\Delta'$  et  $\Delta''$  ont les valeurs indiquées précédemment.

Connaissant  $I_G^0$  nous avons immédiatement par la relation (11):

$$U_A^0 = -\frac{I_G^0}{j\omega C \Delta'''} \left( 3 + \frac{Z_A^0}{Z_N} \right) \quad (14)$$

Les équations (9) permettent la détermination de  $I_B^0$  et  $I_N$ , les équations (7) celle de  $U_A'$ ;  $I_B'$ ;  $I_H'$ ;  $I_D'$ ; et les équations (8) celle de  $U_A''$ ;  $I_B''$ ;  $I_H''$ ;  $I_D''$ .

Conformément aux principes de la décomposition d'un système asymétrique en 3 systèmes symétriques, les courants totaux dans les lignes  $b$  et  $g$  ont alors pour expressions:

$$\left. \begin{aligned} I_{b1} &= I_{B1} + I_{H1} = (I_B' + I_H') + (I_B'' + I_H'') + I_B^0 \\ I_{b2} &= I_{B2} + I_{H2} = a^2 (I_B' + I_H') + a (I_B'' + I_H'') + I_B^0 \\ I_{b3} &= I_{B3} + I_{H3} = a (I_B' + I_H') + a^2 (I_B'' + I_H'') + I_B^0 \\ I_{g1} &= I_{G1} + I_{D1} = (I_G' + I_D') + (I_G'' + I_D'') + I_G^0 \\ &= 3 I_G^0 + I_D' + I_D'' \\ I_{g2} &= I_{G2} + I_{D2} = a^2 (I_G' + I_D') + a (I_G'' + I_D'') + I_G^0 \\ &= a^2 I_D' + a I_D'' \\ I_{g3} &= I_{G3} + I_{D3} = a (I_G' + I_D') + a^2 (I_G'' + I_D'') + I_G^0 \\ &= a I_D' + a^2 I_D'' \end{aligned} \right\} (15)$$

En remarquant que les impédances du système direct sont les mêmes que celles intervenant dans le calcul des courants avant l'apparition du défaut, c'est-à-dire que  $Z_b' = Z_b$ ;  $Z_g' = Z_g$ ;  $Z_B' = Z_B$ ;  $Z_D' = Z_D$ ;  $Z_F' = Z_F$ ;  $Z_H' = Z_H$ ;  $Z_A' = Z_A$ , le remplacement des différents courants dans (15) et (16), par leurs valeurs en fonction de  $I_G^0$  et  $U_A^0$ , permet d'introduire les courants  $I_{bn}$  et  $I_{gn}$  qui circulent respectivement dans les lignes  $b$  et  $g$ , en service normal, toutes choses égales d'ailleurs. Le résultat de ces calculs est alors:

$$\left. \begin{aligned} I_{b1} &= I_{bn} - I_G^0 \left[ \frac{Z_A^0}{\Delta'} \cdot \frac{Z_b^0}{(Z_g^0 + Z_D^0)} \cdot \frac{1}{\left( Z_b' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B'} + \frac{1}{Z_H'}} \right)} + \right. \\ &\left. \frac{Z_A''}{\Delta''} \cdot \frac{Z_b''}{(Z_g'' + Z_D'')} \cdot \frac{1}{\left( Z_b'' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B''} + \frac{1}{Z_H''}} \right)} \right] + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \\ I_{b2} &= a^2 I_{bn} - I_G^0 \left[ a^2 \cdot \frac{Z_A^0}{\Delta'} \cdot \frac{Z_b^0}{(Z_g^0 + Z_D^0)} \cdot \frac{1}{\left( Z_b' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B'} + \frac{1}{Z_H'}} \right)} + a \cdot \frac{Z_A''}{\Delta''} \cdot \frac{Z_b''}{(Z_g'' + Z_D'')} \cdot \frac{1}{\left( Z_b'' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B''} + \frac{1}{Z_H''}} \right)} \right] + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \\ I_{b3} &= a I_{bn} - I_G^0 \left[ a \cdot \frac{Z_A^0}{\Delta'} \cdot \frac{Z_b^0}{(Z_g^0 + Z_D^0)} \cdot \frac{1}{\left( Z_b' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B'} + \frac{1}{Z_H'}} \right)} + a^2 \cdot \frac{Z_A''}{\Delta''} \cdot \frac{Z_b''}{(Z_g'' + Z_D'')} \cdot \frac{1}{\left( Z_b'' + \frac{1}{\frac{1}{Z_B''} + \frac{1}{Z_H''}} \right)} \right] + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_{g1} &= I_{gn} - I_G^0 \left[ \frac{Z'_A}{\Delta'} \cdot \frac{Z'_D}{(Z'_g + Z'_D)^2} + \frac{Z''_A}{\Delta''} \cdot \frac{Z''_D}{(Z''_g + Z''_D)^2} + \frac{Z'_g}{Z'_g + Z'_D} + \frac{Z''_g}{Z''_g + Z''_D} - 3 \right] \\
 I_{g2} &= a^2 I_{gn} - I_G^0 \left[ \frac{a^2 Z'_A}{\Delta'} \cdot \frac{Z'_D}{(Z'_g + Z'_D)^2} + \frac{a Z''_A}{\Delta''} \cdot \frac{Z''_D}{(Z''_g + Z''_D)^2} + \frac{a^2 Z'_g}{Z'_g + Z'_D} + \frac{a Z''_g}{Z''_g + Z''_D} \right] \\
 I_{g3} &= a I_{gn} - I_G^0 \left[ \frac{a Z'_A}{\Delta'} \cdot \frac{Z'_D}{(Z'_g + Z'_D)^2} + \frac{a^2 Z''_A}{\Delta''} \cdot \frac{Z''_D}{(Z''_g + Z''_D)^2} + \frac{a Z'_g}{Z'_g + Z'_D} + \frac{a^2 Z''_g}{Z''_g + Z''_D} \right]
 \end{aligned} \right\} (18)$$

Les expressions générales ainsi obtenues sont trop complexes pour apporter quelque lumière sur la valeur des courants qui s'établissent après l'apparition de la mise à terre accidentelle. Dans la plupart des cas, on peut simplifier notablement ces expressions, en faisant quelques approximations. Nous admettons dans ce qui suit que :

1° la puissance des transformateurs représentés par *A* est assez grande, pour que nous puissions négliger les impédances directes et inverses de court-circuit, c'est-à-dire que  $Z'_A = Z''_A \cong 0$ .

2°  $Z'_g$  et  $Z''_g$  impédances de ligne sont négligeables vis-à-vis de  $Z'_D$  et  $Z''_D$ , ce qui est justifié, car les impédances de ligne ne représentent que quelques pour-cent des impédances globales des groupes de consommateurs, pour des tensions de service de 3 à 20 kV.

Remarquons que pour une ligne, l'impédance inverse est égale à l'impédance directe. Donc

$$Z'_b = Z''_b = Z_b; \quad Z'_g = Z''_g = Z_g$$

Les impédances homopolaires par phase  $Z_b^0$  et  $Z_g^0$  varient de 3 à 4 fois  $Z_b$  et  $Z_g$  respectivement.

Avec ces simplifications les formules précédentes deviennent :

$$\Delta' = \Delta'' = 1 \\
 \Delta''' = \frac{3 Z_N + Z_A^0}{j \omega C Z_N (Z_b^0 + Z_B^0)} + \frac{1}{j \omega C Z_N} + 3 \left( 1 + \frac{Z_A^0}{3 Z_N} \right)$$

$$\left. \begin{aligned}
 U_A^0 &= -U \left[ \frac{3 Z_N + Z_A^0}{3 Z_N + Z_A^0 + j \omega C Z_N (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g) \Delta'''} \right] \\
 I_G^0 &= \frac{U j \omega C Z_N \Delta'''}{3 Z_N + Z_A^0 + j \omega C Z_N \Delta'''} (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g)
 \end{aligned} \right\} (19)$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_{b1} &= I_{bn} + I_B^0 = I_{bn} + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \\
 I_{b2} &= a^2 I_{bn} + I_B^0 = a^2 I_{bn} + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0} \\
 I_{b3} &= a I_{bn} + I_B^0 = a I_{bn} + \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0}
 \end{aligned} \right\} (20)$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_{g1} &= I_{gn} - I_G^0 \left[ \frac{Z_g}{Z_b^0} + \frac{Z_g}{Z_b^0} \right] + 3 I_G^0 \\
 I_{g2} &= a^2 I_{gn} - I_G^0 \left[ a^2 \frac{Z_g}{Z_b^0} + a \frac{Z_g}{Z_b^0} \right] \\
 I_{g3} &= a I_{gn} - I_G^0 \left[ a \frac{Z_g}{Z_b^0} + a^2 \frac{Z_g}{Z_b^0} \right]
 \end{aligned} \right\} (21)$$

Il est encore possible d'apporter quelques simplifications à ces formules, dans chacun des 2 cas envisagés pour le neutre du réseau.

a) Réseau avec neutre isolé

Le neutre isolé correspond à une impédance infiniment grande de la bobine,  $Z_N = \infty$ . La tension homopolaire  $U_A^0$  et le courant  $I_G^0$  s'expriment alors par :

$$U_A^0 = -U \cdot \frac{1}{1 + j \omega C (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g) \cdot \left[ \frac{1}{j \omega C (Z_b^0 + Z_B^0)} + 1 \right]} \quad (22)$$

$$I_G^0 = \frac{U \cdot [1 + j \omega C (Z_b^0 + Z_B^0)]}{(Z_b^0 + Z_B^0) [1 + j \omega C (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g)] + (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g)} \quad (23)$$

En remarquant que dans les cas de mises à terre presque directes qui nous intéressent,  $\omega C (3 R_d + Z_g^0 + 2 Z_g) \ll 1$  pour un réseau aérien, on a avec une approximation suffisante :

$$U_A^0 \cong \frac{-U (Z_b^0 + Z_B^0)}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} \quad (24)$$

$$I_G^0 \cong \frac{U [1 + j \omega C (Z_b^0 + Z_B^0)]}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} \quad (25)$$

b) Réseau avec bobine d'extinction

La bobine est dimensionnée pour laisser passer dans le défaut, un courant inductif qui doit compenser les courants capacitifs. On a dans ce cas assez exactement  $Z_N \cong -\frac{1}{3j\omega C}$ . Généralement l'impédance homopolaire  $Z_A^0$  est minime par rapport à  $Z_N$ , pour les tensions de service considérées, et  $Z_A^0$  peut être laissé de côté vis-à-vis de  $3Z_N$ . Les relations (19) se transforment alors pour un réseau avec bobine d'extinction, en :

$$U_A^0 \cong \frac{-U (Z_b^0 + Z_B^0)}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} \quad (26)$$

$$I_G^0 \cong \frac{U}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} \quad (27)$$

On constate que les expressions de  $U_A^0$ , tension homopolaire au départ des lignes, sont pratiquement identiques pour les réseaux à neutre isolé ou avec bobine d'extinction. Il s'en suit que les courants  $I_{b1}$ ;  $I_{b2}$ ;  $I_{b3}$  et  $I_B^0$ , qui circulent respectivement dans la ligne *b* et dans le neutre de l'appareil con-

sommateur  $B$ , sont sensiblement les mêmes dans les deux cas.

Les expressions (25) et (27) de  $I_G^0$ , tiers du courant de défaut, divergent d'autant moins que la capacité contre terre du réseau, est faible. Pratiquement ces valeurs sont très peu différentes l'une de l'autre, de même que celles des courants dans la ligne  $g$ .

Il est évident que les valeurs de  $U_A^0$  et de  $I_G^0$ , et par suite les surintensités dans les lignes  $b$  et  $g$ , seront d'autant plus élevées que le défaut et le consommateur  $B$ , seront plus rapprochés de l'installation  $A$ , et que la résistance du défaut sera minime, toutes choses égales d'ailleurs. Les valeurs limites sont:

$$U_{A\text{lim}}^0 = -U \text{ dans les 2 cas.}$$

$$I_{G\text{lim}}^0 = \frac{U}{Z_B^0} + j\omega C U \text{ dans le cas du neutre isolé.}$$

$$I_{G\text{lim}}^0 = \frac{U}{Z_B^0} \text{ dans le cas de la bobine d'extinction.}$$

et par suite:

$$\left. \begin{aligned} I_{b1\text{lim}} &= I_{bn} - \frac{U}{Z_B^0} \\ I_{b2\text{lim}} &= a^2 I_{bn} - \frac{U}{Z_B^0} \\ I_{b3\text{lim}} &= a I_{bn} - \frac{U}{Z_B^0} \end{aligned} \right\} \text{ dans les 2 cas.}$$

$$I_{g1\text{lim}} = I_{gn} + \frac{3U}{Z_B^0} + 3j\omega C U$$

pour réseau à neutre isolé.

$$I_{g1\text{lim}} = I_{gn} + \frac{3U}{Z_B^0}$$

pour réseau à bobine d'extinction.

$$\left. \begin{aligned} I_{g2\text{lim}} &= a^2 I_{gn} \\ I_{g3\text{lim}} &= a I_{gn} \end{aligned} \right\} \text{ pour les 2 genres de réseaux.}$$

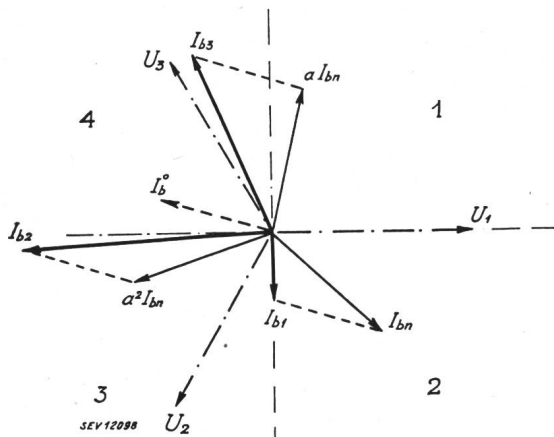


Fig. 2.

Diagramme des courants dans la ligne  $b$

Examinons les courants dans la ligne  $b$ , donnés par les expressions (20). Le courant  $I_B^0 = \frac{U_A^0}{Z_b^0 + Z_B^0}$

qui vient s'ajouter aux courants initiaux, a sensiblement comme valeur

$$I_B^0 \cong \frac{-U}{Z_b^0 + Z_g^0 + 2Z_g + 3R_d + Z_B^0} \quad (28)$$

que le neutre du réseau soit isolé ou relié à la terre inductivement. Cette expression représente un vecteur situé dans le 4<sup>e</sup> quadrant de la fig. 2. Or le déphasage des courants initiaux  $I_{bn}$ ,  $a^2 I_{bn}$ ,  $a I_{bn}$ , par rapport au système de tension  $U_1, U_2, U_3$  est pratiquement de 0 à 50° environ. Il s'en suit que les surintensités dans la ligne  $b$  se produiront essentiellement dans les phases 2 et 3.

Les fig. 3a et 3b représentent les courants dans la ligne  $g$ , pour chacun des deux systèmes relatifs au point neutre du réseau. Ces courants sont donnés par les expressions (21), en introduisant la valeur de  $I_G^0$ .

a) Cas du neutre isolé

$$I_G^0 \cong \frac{U [1 + j\omega C (Z_b^0 + Z_B^0)]}{Z_b^0 + Z_g^0 + 2Z_g + 3R_d + Z_B^0} = -I_B^0 + \frac{j\omega C U (Z_b^0 + Z_B^0)}{Z_b^0 + Z_g^0 + 2Z_g + 3R_d + Z_B^0}$$

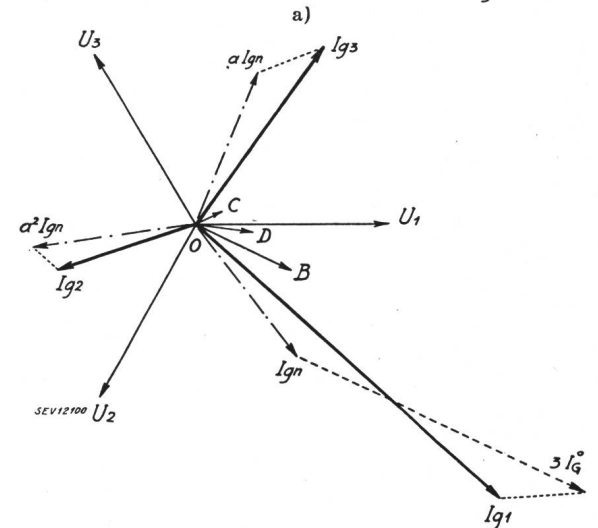
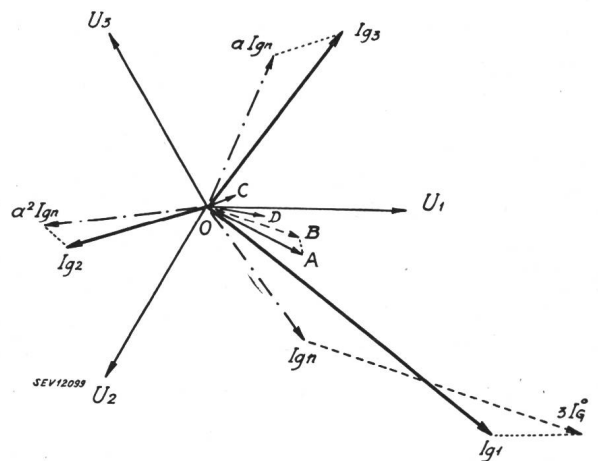


Fig. 3a

Diagrammes des courant dans la ligne  $g$

a) pour réseau à neutre isolé. b) pour réseau avec bobine d'extinction.

$$OA = -I_B^0; \quad OB = I_G^0; \quad OC = I_G^0 \cdot \frac{Z_g}{Z_b^0}; \quad OD = I_G^0 \cdot \frac{Z_g}{Z_b^0}$$

Le 2<sup>e</sup> terme de cette expression est au plus égal à  $j\omega C \cdot U$ , courant capacitif, qui reste dans la plupart des cas, beaucoup plus petit que  $I_B^0$ , donc sans influence prépondérante sur la valeur et la direction de  $I_G^0$ .

$$\text{Des courants} - I_G^0 \left[ \frac{Z_g}{Z_D'} + \frac{Z_g}{Z_D''} \right];$$

$$- I_G^0 \left[ a^2 \frac{Z_g}{Z_D'} + a \frac{Z_g}{Z_D''} \right]; - I_G^0 \left[ a \frac{Z_g}{Z_D'} + a^2 \frac{Z_g}{Z_D''} \right]$$

et  $3 I_G^0$ , qui viennent s'additionner aux courants initiaux, selon les formules (21),  $3 I_G^0$  est de beaucoup le plus important, car  $\frac{Z_g}{Z_D'}$  et  $\frac{Z_g}{Z_D''} \ll 3$ . Nous avons par suite de la direction et de la valeur de ces différents vecteurs, en général une forte surintensité dans la phase 1, tandis que dans les phases 2 et 3, les courants ne sont pas très différents des courants initiaux.

#### b) Cas de la bobine d'extinction

$$I_G^0 \cong \frac{U}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} = - I_B^0$$

Le diagramme des courants est sensiblement le même que celui du cas précédent. L'effet de la capacité contre terre a disparu, à cause de la compensation des courants capacitifs par le courant de la bobine d'extinction.

#### Conclusions

Les résultats des calculs précédents, confirmés d'ailleurs par l'expérience, montrent que la mise à la terre du point neutre d'un appareil consommateur B, alimenté par un réseau aérien à haute tension, a les répercussions suivantes, en cas de terre accidentelle sur une ligne autre, que celle desservant ce consommateur:

Dans les réseaux avec neutre isolé ou avec bobine d'extinction, des surintensités notables se produisent d'une part, dans deux phases de la ligne qui alimente l'appareil B, et d'autre part, dans la phase à la terre de la ligne défectueuse. Ces surintensités peuvent être très importantes, si le défaut se produit à proximité de la station transformatrice d'alimentation, et provoquent généralement la mise hors-service immédiate des deux lignes en question. Si la disjonction n'est pas immédiate, par suite de l'éloignement trop considérable du défaut, par exemple, ces surintensités peuvent être néanmoins incompatibles avec l'exploitation des réseaux, et une interruption de courant sera le plus souvent nécessaire sur la ligne défectueuse, à très brève échéance.

On peut dire que la mise à terre du neutre d'un appareil consommateur, transforme une simple mise à terre accidentelle, en un court-circuit partiel, affectant la ligne défectueuse et la ligne d'alimentation du consommateur.

Pour éviter ces inconvénients dans les réseaux à neutre isolé ou à bobine d'extinction, la solution la plus avantageuse est de supprimer la mise à la terre de l'appareil consommateur incriminé, en

l'isolant par rapport au sol. La solution idéale au point de vue technique consiste à intercaler un transformateur à deux enroulements, entre l'appareil et le réseau; mais cette solution est évidemment fort coûteuse. Comme pis-aller, on peut admettre la mise hors-service immédiate de l'appareil consommateur lui-même, en cas d'apparition d'une mise à terre sur le réseau, au moyen d'un relais soumis au courant de terre de ce consommateur. Cette disposition simple n'est guère satisfaisante pour l'abonné, qui est dans l'impossibilité de remettre son appareil en service, aussi longtemps que le défaut n'a pas été éliminé.

Pour terminer, nous donnons ci-dessous un exemple numérique, se rapportant au cas réel qui s'est présenté sur le réseau de la Compagnie Vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe.

#### Exemple

Il s'agit d'un réseau à 13 kV avec bobine d'extinction, alimentant une chaudière à électrodes de 5000 kW. Lors des essais, une mise à terre a été créée à la station même, sur une ligne dont la charge était nulle par ailleurs. Les données étaient les suivantes:

Courant avant l'apparition du défaut:

$I_{Bn} = I_{bn} = 180$  A; c'est le courant absorbé par la chaudière, pour une puissance de 4000 kW environ.

$$I_{Dn} = 0 \quad I_{gn} = 0 \quad U = \frac{13500}{\sqrt{3}} = 7800 \text{ V}$$

$$Z_A^0 \cong j 5 \text{ } \Omega/\text{phase}$$

$$Z_g = Z_g^0 = 0$$

$$Z_b^0 = 0,6 + j \cdot 3,2 \text{ } \Omega/\text{phase}$$

$$R_d = 1 \text{ } \Omega$$

$$Z_B^0 = 40 \text{ } \Omega/\text{phase}$$

Avec ces valeurs, les calculs donnent:

$$I_B^0 = \frac{-U}{Z_b^0 + Z_B^0 + Z_g^0 + 2 Z_g + 3 R_d} =$$

$$= \frac{-7800}{0,6 + j 3,2 + 40 + 3} \cong -179 \text{ A}$$

$$I_{b1} = 180 - 179 \cong 0$$

$$I_{b2} = a^2 \cdot 180 - 179 = -269 - j 156 \text{ A}$$

$$I_{b3} = a \cdot 180 - 179 = -269 + j 156 \text{ A}$$

$$|I_{b1}| = 0; |I_{b2}| = |I_{b3}| = \underline{311 \text{ A}}$$

$$I_G^0 = -I_B^0 = 179 \text{ A}$$

$$I_{g1} = 3 I_G^0 = \underline{537 \text{ A}}$$

$$I_{g2} = I_{g3} = 0$$

Les surintensités obtenues sont donc importantes; elles ont même été plus élevées encore, en réalité, du fait que l'impédance de la chaudière ne reste pas constante, mais diminue, probablement par suite d'une vaporisation intense à l'intérieur de la chaudière, sur les deux phases soumises à une élévation de potentiel.

Les courants produits lors des essais ont provoqué chaque fois, le déclenchement immédiat des lignes b et g, comme ce fut du reste maintes fois le cas en exploitation.