

Etude d'un accident d'électrocution dans une taille mécanisée d'un charbonnage

R. FRADCOURT
Ingénieur Principal Divisionnaire des Mines

par
et

J. LARET
Ingénieur des Mines

SAMENVATTING

Een collectief ongeval door electrocutie deed zich onlangs voor in een ontginningswerkplaats van een kolenmijn.

De pijler was uitgerust met een pantserketting met schaaf en in de voetgalerij was een laadpantser opgesteld.

Deze inrichtingen waren aangedreven door elektrische motoren gevoed onder wisselspanning 550 V door een driefasig net met geïsoleerd nulpunt. Op zeker ogenblik deed zich een accidentele kortsluiting voor tussen een fase en de massa, in een aansluitingskastje van de onderste motor van de pijlerpantser. Na het ongeval werd bovendien een tweede voorafbestaande aardsluiting vastgesteld in de statorwindingen van de motor van de laadpantser.

Tengevolge van deze dubbele aardsluiting van het net op 550 V werden de metalen inrichtingen van de pijler en van de galerij op een gevaarlijke potentiaal gebracht, evenals een gedeelte van de ondersteuning.

Drie werklieden werden op verschillende punten van de pijler gedood en andere gekwetst.

De aardingsweerstand van de massa, gemeten aan het front van de voetgalerij, bedroeg 0,35 ohm.

De verbinding van de massa met de aardleiding was onderbroken op het ogenblik van het ongeval, maar er bleef een aardverbinding bestaan van 9,5 ohm door het contact van de pantserketting met de vloer.

In de gevallen zoals het huidige waarin zich een isolatiegebrek voordoet op twee verschillende plaatsen, gaat een zeer belangrijke stroom door de massa, tussen de beide defecten en, in het algemeen, door de aardverbinding, de vloer inbegrepen.

De theoretische studie toont aan dat zelfs met bijvoeging van plaatselijke aardingen en ook bij zeer lage aardingsweerstand, gevaarlijke potentialen kunnen ontstaan op de inrichtingen of op zekere gedeelten ervan.

De auteurs besluiten dat het enige middel om dit gevaar te vermijden erin bestaat de mogelijkheid van het ontstaan van een dubbele fout uit te sluiten. Dit wordt gerealiseerd door de permanente controle van de isolatie van het net, met onmiddellijke uitschakeling in geval van een enkele ernstige fout.

Deze maatregel is tevens van aard om de veiligheid t.o.v. brand en van mijngas aanzienlijk te bevorderen.

RESUME

Un accident collectif d'électrocution s'est produit récemment dans un chantier d'une mine de charbon. La taille était équipée d'un convoyeur blindé avec rabot et la voie de base d'un convoyeur blindé répartiteur. Ces engins étaient actionnés par des moteurs électriques alimentés sous la tension alternative de 550 V par un réseau à neutre isolé. Une mise à la masse d'une phase s'est produite accidentellement à la boîte à bornes du moteur inférieur du convoyeur blindé de la taille. Après l'accident, il fut constaté qu'une deuxième mise à la masse existait également en un point d'un enroulement statorique de phase du moteur du convoyeur blindé de la voie.

Comme conséquence de cette double mise à la masse du réseau à 550 V, les installations métalliques de la taille, y compris une partie du soutènement, ainsi que celles de la voie ont été portées à un potentiel

dangereux. Trois ouvriers, répartis sur toute la longueur de la taille, furent tués et d'autres commotionnés.

Le réseau électrique comportait un circuit de masse dont la résistance de mise à la terre, mesurée à front de la voie de base du chantier, atteignait 0,35 ohm.

Le raccordement à ce circuit du convoyeur blindé de la taille était interrompu au moment de l'accident, mais il subsistait une mise à la terre de 9,5 ohms de résistance par le contact de ce convoyeur avec le sol.

Dans les cas où, comme ici, un défaut d'isolement se produit en deux endroits d'un réseau et sur des phases différentes, il circule un courant important entre ces défauts par le circuit de masse et, d'une façon générale, par le réseau de mise à la terre, y compris le sol.

L'étude théorique montre que, même avec l'adjonction de terres locales et avec des valeurs de résistances de mise à la terre très faibles, des potentiels dangereux peuvent s'établir sur les installations ou certaines parties d'entre elles.

Les auteurs en concluent que le remède à ce danger consiste dans la suppression même de la possibilité de formation d'un double défaut d'isolement. Ceci est réalisé par le contrôle permanent de l'isolement du réseau avec déclenchement instantané en cas de défaut simple grave.

Cette mesure renforce aussi considérablement la sécurité vis-à-vis des dangers d'incendie et du grisou.

Rappel des données de l'accident (fig. 1).

L'électrocution s'est produite dans une taille électriflée à convoyeur blindé et rabot. La galerie de base était équipée d'un panzer répartiteur débitant

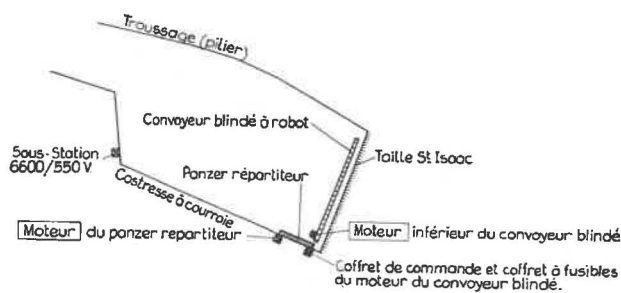


Fig. 1. — Situation géographique des installations.

sur une courroie. L'électrisation des installations (convoyeur blindé de taille, panzer répartiteur et une partie du soutènement métallique) a été causée par :

1°) Le fauchage de la boîte à bornes (entrée de câble) du moteur inférieur du convoyeur blindé par un étau, à la suite d'un déplacement fortuit de la tête motrice inférieure. Un des trois conducteurs de phase du câble triphasé d'alimentation a été mis à la masse du moteur. On sait que, dans ces conditions, la tension entre phases et terre qui est de $\frac{U}{\sqrt{3}}$ (tension entre phases) devient égale à U , soit environ 550 V dans le cas présent.

2°) La mise à la masse à peu près simultanée d'un des enroulements de phase du moteur triangle du panzer répartiteur de la voie de base. Cette mise à la masse a été probablement une conséquence du premier défaut pour deux raisons.

a) Comme dit ci-dessus la tension qui s'appliquait à l'isolement de l'enroulement est passée de $\frac{U}{\sqrt{3}}$ à U et cela a pu amorcer un claquage à un endroit où l'isolement était affaibli ;

b) La mise à la masse (ou à la terre) d'une phase d'un réseau triphasé produit, lorsqu'elle se fait d'une manière instantanée, une onde de tension dans le réseau due aux capacités et qui peut également être cause d'un claquage.

Lorsque les deux défauts se produisent sur des phases différentes, il s'établit un courant de court-circuit par le circuit de mise à la terre auquel s'applique la tension de 550 V. Dans le cas présent, la résistance du circuit de terre était de 9,85 ohms et le courant de court-circuit a pu atteindre la valeur de

$$\frac{550}{9,85} = 56 \text{ A,}$$

insuffisante pour faire déclencher le disjoncteur ou fondre les fusibles de 100 A qui protégeaient les moteurs. Les conditions d'électrocution se trouvaient dès lors réalisées sur la base des normes suivantes, généralement admises par les auteurs :

Résistance du corps humain : 1.000 ohms et parfois moins, lorsque les conditions sont défavorables, ce qui est le cas au fond de la mine où le personnel est en transpiration et en contact assez intime avec le sol.

Courant d'électrocution : 0,050 A (d'après les normes allemandes).

Durée minimum de ce courant pour provoquer l'électrocution : 0,2 s.

Les conséquences de l'accident ont été de porter toutes les installations métalliques de la taille à un potentiel dangereux. Trois ouvriers ont été tués, trois autres fortement commotionnés, d'autres ont subi des secousses plus ou moins graves. Les ouvriers tués se trouvaient respectivement en tête, au milieu et au pied de la taille.

Du point de vue de l'accident, l'installation électrique peut se ramener à ce qui suit (fig. 2 et 3) :

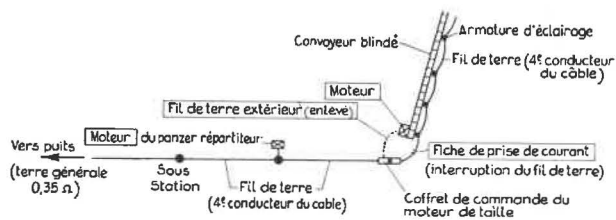


Fig. 2. — Réseau de mise à la terre.

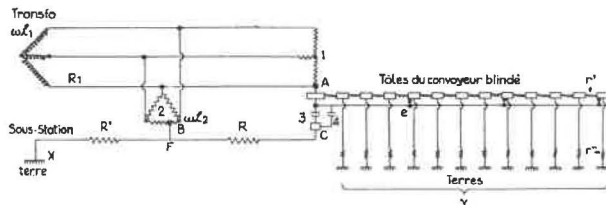


Fig. 3. — Traduction en schéma électrique de la fig. 1 au moment de l'accident: mises à la masse aux points A et B.

- 1 : moteur convoyeur blindé de la taille.
- 2 : moteur triangle panzer répartiteur.
- C : coffret de commande de ce moteur.
- A : mise à la masse d'un conducteur de phase au convoyeur blindé.
- B : mise à la masse d'un enroulement du moteur 2.
- ωL_1 : impédance du secondaire du transfo.
- ωL_2 : impédance de la partie d'enroulement du moteur 2 traversée par le courant de court-circuit = résistance d'isolement de ce moteur.
- R : résistance du conducteur de mise à la terre, entre moteurs 1 et 2 (circuit interrompu en 3 au moment de l'accident: vol du fil de terre entre moteur 1 et coffret).
- e : circuit d'éclairage: 1 armature tous les 7,50 m sur le convoyeur blindé; armatures de lampes reliées entre elles par conducteur de terre (circuit de terre interrompu en 4: fiche de courant mal reconnectée).
- R' : résistance du conducteur de mise à la terre, entre la sous-station (terre générale) et le moteur 2.
- R_1 : résistance des conducteurs de phase depuis la sous-station jusqu'aux moteurs 1 et 2.
- r' : résistance ohmique entre 2 tôles.
- r'' : résistance de mise à la terre de chaque tôle (par contact direct avec le sol).
- Y : résistance de mise à la terre du convoyeur blindé.
- X : résistance de la prise générale de terre (à la sous-station ou sur le réseau de mise à la terre).

1°) La sous-station du quartier sinistré, qui est installée à environ 1.300 m des puits, reçoit le courant sous 6.600 V et le distribue sous 550 V.

Elle comprend un transfo au quartz de 200 kVA, un interrupteur et des fusibles à haut pouvoir de coupure de 32 A du côté haute tension et un disjoncteur dans l'air du côté basse tension. Ce disjoncteur est équipé de relais magnétiques temporisés, réglés à 250 A et 4 s. La temporisation est nécessaire pour permettre le démarrage en court-circuit des moteurs du quartier.

L'alimentation à haute tension est effectuée par un câble armé de $4 \times 16 \text{ mm}^2$ de section, le 4^e conducteur incorporé servant de conducteur de mise à la terre, en parallèle avec l'armature du câble. Ce circuit de mise à la terre part de la terre générale établie à proximité des puits au moyen de plaques

métalliques enfouies dans le sol en des endroits humides.

La distribution du courant de la sous-station au moteur du panzer répartiteur et aux coffrets de commande de l'installation de la taille (moteurs et éclairage) s'effectue en partie par des câbles armés, en partie par des câbles souples, mais tous à 4^e conducteur de terre incorporé, de 16 mm^2 de section. Ce circuit de mise à la terre était raccordé à la masse du moteur du panzer répartiteur et des coffrets de commande.

La valeur de la résistance de mise à la terre de ce circuit, mesurée par la méthode des sondes tant à front du chantier (coffret de commande) qu'à l'accrochage, est de 0,35 ohm, valeur excellentement faible.

La longueur de câble séparant le moteur inférieur du convoyeur blindé de la sous-station est de 350 m. La longueur du câble entre ce moteur et le moteur du panzer répartiteur de la costresse est de 215 m. Partant de la sous-station, c'est le même câble qui alimente, d'une part, la taille et, d'autre part, à partir d'une boîte de dérivation, le moteur du panzer répartiteur.

2°) Les coffrets de commande de l'installation de la taille, reliés entre eux par des conducteurs de mise à la terre et pouvant, à ce point de vue, être considérés comme un seul coffret.

Le conducteur de terre du câble, venant de la sous-station, était connecté à la masse du coffret, à une borne prévue à cet effet dans l'entrée du coffret.

Côté sortie, le coffret du circuit de signalisation et d'éclairage du convoyeur blindé de taille, présentait également une telle borne à laquelle était raccordé le conducteur de terre incorporé de 6 mm^2 du câble souple triphasé alimentant ce circuit. Malheureusement, la fiche de prise de courant, insérée dans le câble pour en permettre le ravalement journalier, avait été ouverte quelques heures avant l'accident par l'électricien du chantier qui avait omis, en la refermant, de reconnecter le conducteur de terre. Le circuit de mise à la terre du convoyeur blindé par les armatures de lampes était ainsi coupé.

Par contre, la boîte de sortie du coffret à contacts, alimentant le moteur inférieur du convoyeur blindé, ne possédait pas de vis spéciale pour le raccordement intérieur d'un conducteur de terre.

L'alimentation du moteur s'effectuait au moyen d'un câble souple triphasé de $4 \times 25 \text{ mm}^2$ de section. Le 4^e conducteur incorporé, destiné à la mise à la terre, n'avait pas été raccordé pour la raison qui vient d'être dite et l'exploitant avait assuré la mise à la terre du moteur par un fil extérieur en cuivre nu, fixé d'une part au moteur et d'autre part au coffret au moyen de boulons de serrage. Cette solution, autorisée par le règlement actuel, est d'ailleurs préconisée par certains auteurs qui prétendent qu'un circuit de mise à la terre visible peut être

mieux contrôlé et surveillé qu'un circuit non visible. Cela est vrai à condition que le personnel respecte l'installation. Dans le cas présent, bien que le personnel de la taille comportât un électricien ayant mission d'assurer le contrôle journalier des installations électriques et du fil de terre, celui-ci a été en partie sectionné et enlevé dans les 36 heures ayant précédé l'accident. De sorte que le circuit proprement dit de mise à la terre du convoyeur blindé de la taille était coupé.

Depuis lors, on a rétabli le conducteur de terre extérieur, mais on a également assuré la mise à la terre par le 4^e conducteur incorporé, en raccordant celui-ci, dans la boîte de sortie du coffret, à l'un des goujons de fixation du couvercle de l'entrée du câble, goujons qui assurent l'antidéflagrance de cette fermeture, solution déjà adoptée dans d'autres charbonnages. Ce faisant, on risque toutefois de nuire à l'antidéflagrance si la prise du goujon dans son pas de vis devient insuffisante. Cette solution a la valeur d'une solution de débrouillardise. Dans les mines grisouteuses, le remède peut être pire que le mal et il vaudrait mieux que chaque appareil comporte, côté sortie et côté entrée, une borne de prise de terre.

Le coffret à contacteurs du moteur inférieur du convoyeur blindé est équipé de relais thermiques et d'un boîtier à fusibles de 100 A à haut pouvoir de coupure.

3^o) Le moteur inférieur du convoyeur blindé est un moteur de 33 kW à stator en étoile. La boîte à bornes servant à l'entrée du câble est en saillie de 15 cm environ sur le gabarit extérieur du moteur. Afin d'éviter le risque de scalpage par une bête, l'exploitant avait disposé le moteur de manière à présenter la boîte à bornes sur le côté.

4^o) L'installation de signalisation comporte une lampe tous les 7,50 m le long du convoyeur blindé. Les armatures de ces lampes sont fixées au convoyeur blindé et reliées entre elles par fil de terre.

5^o) Le moteur du panzer répartiteur a également une puissance de 33 kW. Le stator est bobiné en triangle. La mise à la masse par claquage de l'isolant s'est faite à la 27^e spire d'un enroulement de phase de 144 spires. La mesure d'isolement effectuée le 26 octobre avait donné une résistance d'isolement de 10 Megohms (10^7 ohms).

Enseignements de l'accident.

De ce qui précède, les mesures suivantes nous paraissent pouvoir être conseillées :

1^o) La construction des moteurs à boîte à borne encastrée est préférable car elle supprime le risque de cisaillement de cette boîte par une bête ou un étançon. Il subsiste néanmoins le risque d'un coinçage du câble qui ne peut être supprimé.

Lorsque la boîte à bornes est en saillie, il est souhaitable de la protéger par un masque métallique solide.

2^o) Il résulte de l'accident que ni la réalisation de la mise à la terre par conducteur extérieur en cuivre nu, ni celle par 4^e conducteur incorporé (avec fiche de prise de courant insérée) ne garantissent une mise à la terre effective.

3^o) Chaque boîte à bornes d'appareil électrique devrait comporter une borne intérieure de prise de terre.

4^o) Il est à conseiller d'assurer la mise à la terre effective d'un réseau souterrain par enfouissement de plaques ou de tubes en plusieurs endroits propices distincts, ceci pour pallier l'insuffisance occasionnelle d'une de ces prises de terre. La résistance de la prise de terre dépend en effet de divers facteurs, notamment la conductibilité du sol qui peut varier fortement avec l'humidité. Il est à noter d'ailleurs que les cadres de soutènement et les tuyauteries participent également à la réalisation des prises de terre, ne fut-ce qu'en raison du contact entre les armatures des câbles et ces pièces.

Néanmoins, l'application de ces mesures ne suffit pas à supprimer le danger d'électrocution dans le cas qui nous occupe, pour deux raisons.

a) Certains auteurs et des organismes agréés considèrent comme bonne une résistance ohmique maximum de 10 ohms pour une prise de terre. Le R.G.P.T. ne prescrit pas de valeur. La résistance de 10 ohms est trop élevée pour les travaux souterrains. En effet, dans le cas de l'accident, la mise à la terre du convoyeur blindé n'était plus assurée que par le simple contact de ce convoyeur avec le sol de la taille, puisque la liaison avec le conducteur général de mise à la terre était coupée. Cependant, la résistance de mise à la terre du convoyeur, mesurée dans ces conditions par la méthode des sondes, n'atteignait que 9,5 ohms. A titre comparatif, les résistances ohmiques par rapport à la terre des tuyauteries d'eau et d'air comprimé étaient respectivement de 3 ohms et de 6,5 ohms. Le raccordement du convoyeur à une plaque supplémentaire de prise de terre au pied de taille, par exemple, n'eut pas amélioré sensiblement la situation. Une telle plaque de 0,5 m² de surface, enfouie dans la costresse en sol sec, présente une résistance de mise à la terre de 75 ohms. En humidifiant fortement, la résistance tombe à 20 ohms et il n'a pas été possible de faire descendre cette résistance en dessous de 14 ohms, même en noyant l'excavation remblayée dans laquelle la plaque était disposée.

L'augmentation de la surface de la plaque n'améliore guère la situation, car la résistance d'une prise de terre localisée tend vers une limite qui dépend de la répartition des surfaces équipotentielles autour de cette prise de terre locale. Pour obtenir une diminution notable, il faut établir les prises à une distance

suffisante l'une de l'autre (10 à 20 m, par exemple, pour que la répartition des surfaces équipotentielles d'une prise n'influence pas celle de la prise voisine).

D'ailleurs les valeurs de résistances ohmiques de mise à la terre citées plus haut sont encore de loin supérieures à la résistance ohmique de 0,35 ohm qui était celle de la prise générale de terre du siège. Dans le cas où le convoyeur blindé eut été correctement relié à cette terre générale, le danger d'électrocution n'était pas supprimé car le potentiel qui se serait appliqué au convoyeur blindé aurait été fixé, non pas par la résistance des prises de terre, mais par la résistance du conducteur du circuit de masse reliant les deux moteurs et par le courant de court-circuit le traversant. Or, si l'on admet les normes dites plus haut (résistance du corps humain = 1.000 ohms et courant d'électrocution de 50 milliampères pendant 0,2 s), la tension d'électrocution n'est que de 50 V et peut être facilement atteinte.

b) Entre les tôles du convoyeur blindé existent des résistances ohmiques importantes : nous avons mesuré, après l'accident, des résistances de mise à la terre des tôles variant entre 14 ohms et 650 ohms.

Cela signifie que, si les têtes motrices sont convenablement mises à la terre, le convoyeur lui-même ne l'est pas. En cas de mise à la masse d'une phase d'un câble le long du convoyeur blindé, celui-ci pourrait être porté à une tension supérieure à 50 V sur une partie de sa longueur, si une seconde phase est mise à la masse en un autre endroit du réseau.

Dans ces conditions, il nous est apparu nécessaire d'étudier de plus près les possibilités d'électrocution en vue d'en dégager les moyens de prévention.

**Etude des risques d'électrocution
des mises à la masse
des phases d'un réseau souterrain.**

Divers cas peuvent se présenter, que nous passons en revue pour nous rendre compte comment la protection du personnel est assurée dans chacun d'eux.

1^{er} cas (fig 4).

Une pièce M ou une carcasse de coffret ou de moteur non mise à la terre (par exemple par suite d'un mauvais contact ou de la rupture du conducteur de terre) entre en contact avec une phase d'un réseau triphasé, supposé parfaitement isolé. Rien ne se pro-

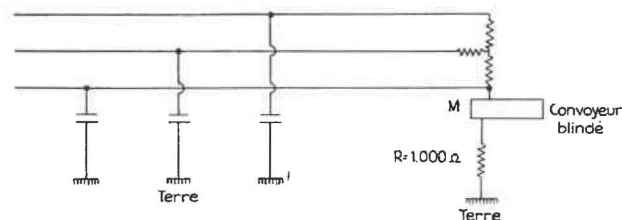


Fig. 4.

duit dans la marche du réseau. Mais, une personne touchant la pièce M se trouve dans la situation de la résistance R du schéma. La tension E, appliquée à la pièce M et due aux courants d'échange entre phases par les capacités C du réseau, se calcule par la formule :

$$E = \frac{\sqrt{3} \omega CRU}{\sqrt{1 + 9 \omega^2 C^2 R^2}}$$

dans laquelle

- U = tension entre phases du réseau
- C = capacité par phase du réseau
- R = résistance de la personne.

Si U = 550 V, R = 1.000 ohms ($\omega = 2 \pi f = 314$), la tension E sera mortelle (50 V) si C = 0,166 μ F (microfarads).

Une telle valeur se rencontre facilement dans un réseau souterrain. Citons à cet égard quelques valeurs données par M. Bihl (microfarads par kilomètre de câble) :

	Câble	Isolement papier	Isolement en caoutchouc
μ F/km	3 × 95 mm ²	0,29	0,61
	3 × 25	0,20	0,56
	3 × 16	0,19	0,57

Si, par contre, la pièce M est mise à la terre par une résistance de terre de 10 ohms, la capacité devrait être environ 100 fois plus grande pour engendrer une tension mortelle. Ceci n'est pas possible, sauf pour les réseaux de câbles très étendus.

Dans ce cas donc, une mise à la terre de 10 ohms protège à coup sûr contre les dangers d'électrocution.

2^e cas (fig. 5).

Une pièce M ou une carcasse de moteur non mise à la terre entre en contact avec une phase du réseau, alors que les deux autres phases présentent par rap-

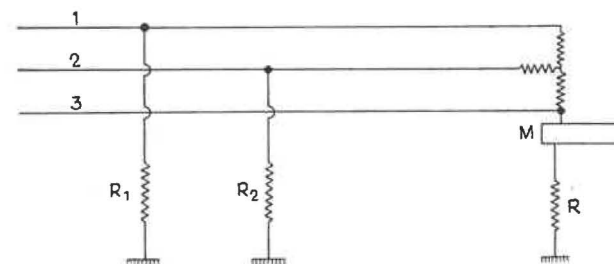


Fig. 5.

port à la terre des isolements égaux à R1 et R2. Nous supposons que le courant capacitif a un effet négligeable, ce qui est le cas du réseau envisagé.

Si une personne vient à toucher la pièce M, elle se place dans la situation de la résistance R du schéma et la tension entre la pièce M et la terre s'établit à la valeur :

$$E = \frac{U}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R}} \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_1 R_2}}$$

formule dans laquelle U est la tension entre phases du réseau.

a) Si nous supposons tout d'abord que les 2 résistances d'isolement de phase R_1 et R_2 sont égales, la formule devient :

$$E = \frac{UR \sqrt{3}}{R_1 + 2R}$$

En y faisant $E = 50$ V (tension d'électrocution) $R = 1.000$ ohms et $U = 550$ V, on trouve qu'il y aura danger d'électrocution si $R_1 = 16.030$ ohms, c'est-à-dire si la résistance d'isolement totale du réseau est tombée à $16.030/2$ ohms = 8.015 ohms (voir conclusions finales).

Si, par contre la pièce M est mise à la terre par une résistance de 10 ohms, il y aura danger d'électrocution pour $R_1 = 160$ ohms, c'est-à-dire lorsque l'isolement du réseau tombera à 80 ohms (voir conclusions).

b) Si l'on suppose que l'une des phases a conservé un bon isolement, c'est-à-dire si dans la formule générale on fait $R_2 = \infty$, cette formule devient :

$$E = \frac{RU}{R + R_1}$$

et il y a électrocution pour $R_1 = 10.000$ ohms, c'est-à-dire lorsque l'isolement général du réseau sera tombé à 10.000 ohms (voir conclusions).

Si, par contre, la pièce M est mise à la terre par une résistance de 10 ohms (cas du convoyeur blindé : 9,5 ohms), il y aura danger d'électrocution lorsque l'isolement du réseau tombera à $R_1 = 100$ ohms — R_1 représente ici la résistance d'isolement de l'enroulement de phase défectueux du moteur du panzer répartiteur de la costresse (voir conclusions).

Supposons maintenant que le fil de masse (reliant le moteur du convoyeur blindé à la terre générale du coffret) n'ait pas été coupé. Nous pourrions alors considérer que R est égal à la résistance de mise à la terre du moteur du convoyeur de taille, soit 0,35 ohms.

On trouve par la formule précédente : $R_1 = 3,5$ ohms. Il aurait donc fallu, dans ce cas, que la résistance d'isolement du moteur du panzer répartiteur tombât à 3,5 ohms pour qu'il y ait risque d'électrocution. En réalité, cette valeur de R_1 doit être légèrement plus faible (voir plus loin) car il faut tenir compte de la chute de tension qui se produit dans ce cas dans le transformateur et dans le réseau triphasé. C'est ce que nous allons examiner.

Etude de ce qui se serait passé dans la taille de l'accident si le convoyeur blindé avait été relié au réseau général de mise à la terre.

1^{re} hypothèse.

Convoyeur blindé raccordé à la prise de terre générale du siège de 0,35 ohm de résistance, mais supposé isolé du sol de la taille.

Le réseau se serait alors présenté comme au schéma de la figure 6, tiré de la figure 3.

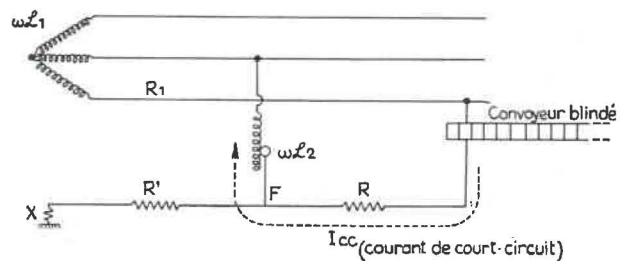


Fig. 6 (tirée de la Fig. 3).

On constate tout d'abord qu'en cas de court-circuit, la résistance X (0,35 ohm au siège en question) de la prise de terre n'entre pas en ligne de compte puisque le courant de court-circuit ne la traverse pas. Elle fixe simplement le potentiel zéro (de la terre) au point F.

On peut alors, d'après les longueurs des câbles et des fils et leurs résistances unitaires, déterminer que

a) résistance du fil de terre entre convoyeur blindé de la taille et moteur du panzer répartiteur = 0,2 ohm = R

b) résistance des conducteurs des 2 phases en cause depuis le transfo jusqu'au moteur du convoyeur blindé et au moteur du panzer répartiteur = 0,216 ohm = R_1 .

L'impédance de fuite du secondaire du transfo vaut, par phase :

$$\omega \mathcal{L}_1 = 0,0605 \text{ ohm.}$$

1^{er} cas — $\omega \mathcal{L}_2 = 0$ (impédance du bobinage du moteur du panzer répartiteur).

C'est le cas qui se serait produit si, en plus du contact franc du conducteur de phase au moteur de la taille, il y avait eu un contact franc entre une extrémité du bobinage du moteur du panzer répartiteur et la masse.

Le courant de court-circuit aurait eu pour valeur :

$$I = \frac{U \times 0,8}{\sqrt{(R + R_1)^2 + 4\omega^2 \mathcal{L}_1^2}} = \frac{550 \times 0,8}{\sqrt{0,416^2 + 0,121^2}} = 1.000 \text{ A}$$

Nous avons multiplié la tension U par le coefficient 0,8 pour tenir compte des chutes de tension dans le primaire du transfo et dans le réseau H.T.

Avec un $I_{cc} = 1.000 \text{ A}$, les fusibles de protection à haut pouvoir de coupure, de 100 A, auraient coupé le courant en 0,005 s, d'après leur courbe de fonctionnement.

Il n'y aurait donc pas eu électrocution puisqu'il est admis que celle-ci ne peut se produire que si le contact du corps de l'homme avec une pièce sous tension dure au moins 0,2 s. La tension sur le convoyeur blindé de la taille, par rapport à la terre, aurait été égale à $R \times I_{cc} = 0,2 \times 1.000 = 200 \text{ V}$.

2^{me} cas — $\omega \mathcal{L}_2 \neq 0$, c'est-à-dire contact d'un enroulement de phase du moteur du panzer répartiteur avec la masse en un point de cet enroulement.

Pour qu'il y ait risque d'électrocution (toujours avec fil de mise à la terre raccordé), il faut que le convoyeur blindé de la taille puisse être porté par rapport à la terre à une tension d'au moins 50 V et que celle-ci se maintienne sur le convoyeur blindé pendant au moins 0,2 s.

Ceci ne peut avoir lieu que si :

a) le courant de court-circuit I_{cc} est suffisant pour donner, à travers la résistance R du conducteur de mise à la terre, une chute de tension de 50 V, c'est-à-dire si

$$I_{cc} > \frac{50}{0,2} = 250 \text{ A}$$

b) le courant de court-circuit I_{cc} est suffisamment faible pour que les fusibles fonctionnent après un temps plus long que 0,2 s. D'après les courbes de fonctionnement des fusibles, ceci a lieu pour

$$I_{cc} < 480 \text{ A}$$

Pour qu'il y ait danger d'électrocution, il faut donc que

$$250 \text{ A} \leq I_{cc} \leq 480 \text{ A}$$

Il faut donc que l'impédance ou partie d'impédance $\omega \mathcal{L}_2$ du bobinage du moteur du panzer répartiteur ait pour valeur

$$0,82 \text{ ohm} < \omega \mathcal{L}_2 < 1,78 \text{ ohm}$$

Ces deux valeurs se déduisent de la formule

$$I = \frac{U \times 0,9}{\sqrt{(R + R_1)^2 + (2\omega \mathcal{L}_1 + \omega \mathcal{L}_2)^2}}$$

dans laquelle on fait respectivement $I = 250 \text{ A}$, et $I = 480 \text{ A}$ et dans laquelle nous avons admis une chute de tension de 10 % (coefficient 0,9) dans le

primaire du transfo et dans le réseau HT ($\omega \mathcal{L}_1$ tient compte, lui, de la chute de tension dans le secondaire du transformateur).

2^e hypothèse (fig. 7 et 8).

En réalité, le convoyeur blindé n'est pas isolé du sol et, en plus de sa connexion au réseau général de

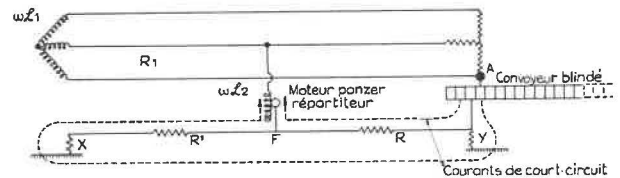


Fig. 7.

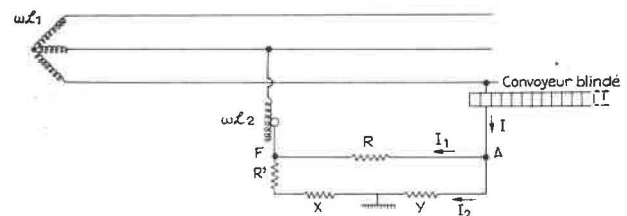


Fig. 8.

mise à la terre, il possède une *terre particulière* Y due :

- soit à son propre contact avec le sol ($R_{\text{terre}} = 9,5 \text{ ohms}$) dans le cas de l'accident ;
- soit à un raccordement à une prise de terre locale, par exemple une plaque enfouie dans le sol ($R_{\text{terre}} = 14 \text{ ohms}$ dans le chantier de l'accident) ou bien une tuyauterie à eau ($R_{\text{terre}} = 3 \text{ ohms}$ dans le chantier de l'accident).

Ces valeurs de 14 et 3 ohms résultent d'essais faits après l'accident.

Cette situation est représentée à la figure 7 où

$\omega \mathcal{L}_1$ = impédance du transformateur.

$\omega \mathcal{L}_2$ = impédance de la partie d'enroulement du moteur parcourue par le courant de court-circuit.

$R = 0,2 \text{ ohm}$: résistance ohmique du conducteur de mise à la terre entre les deux moteurs.

R' = résistance du conducteur de mise à la terre générale depuis le moteur du panzer répartiteur jusqu'à la sous-station (terre générale). Dans le cas du siège dont il est question, cette résistance était égale à 0,3 ohm (elle est de l'ordre de 0,1 ohm par 100 m de conducteur de 16 mm² de section).

X = résistance de la prise de terre générale.

Y = résistance de la prise de terre locale à l'endroit du convoyeur blindé.

On voit que le courant de court-circuit I va de A à F par deux chemins parallèles : d'une part, la résistance R du conducteur de terre, d'autre part, par le circuit de la terre même (résistances Y, X et R').

Dès lors, le schéma électrique peut être présenté comme indiqué à la figure 8. Le courant de court-circuit I, qui influence les protections par disjoncteur ou fusibles, se subdivise en un courant I₁ à travers la résistance R et en un courant I₂ par le circuit du sol. C'est ce dernier, I₂, qui, en traversant la résistance de terre Y, fixe le potentiel E qui s'applique au convoyeur blindé et il y aura danger d'électrocution lorsque E = 50 V.

On peut remplacer les deux circuits en parallèle par une résistance équivalente R_e :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R} + \frac{1}{X + Y + R'}$$

$$R_e = \frac{R(X + Y + R')}{R + X + Y + R'} \quad (a)$$

La tension entre A et F est : V = R_e × I

Le courant I₂ vaut donc :

$$I_2 = \frac{V}{X + Y + R'} = \frac{R_e \times I}{X + Y + R'}$$

La tension E = Y × I₂ = $\frac{R_e \times Y}{X + Y + R'} \times I$

$$I = \frac{E(X + Y + R')}{R_e \times Y} \quad (b)$$

En nous plaçant dans les conditions de l'accident (E = 50 V, tension mortelle, R = 0,2 ohm — R' = 0,5 ohm), nous pouvons examiner quelle est la valeur du courant de court-circuit I pour différentes valeurs possibles de X et Y (résistances des prises de terre) et voir quel est le risque d'électrocution dans chaque cas. Il suffira de choisir les valeurs pour couvrir la généralité des cas possibles.

1^{er} cas — Résistances X et Y équilibrées

X (résistance de la prise générale de terre) = 10 ohms ;

Y (résistance de la prise locale de terre) = 10 ohms.

La formule (a) donne :

$$R_e = \frac{0,2 \times 20,3}{20,5} = 0,2 \text{ ohm}$$

La formule (b) donne :

I = courant de court-circuit minimum engendrant un potentiel de 50 V sur le convoyeur blindé.

$$I = \frac{50 \times 20,3}{0,2 \times 10} = 507 \text{ A} > 480 \text{ A}$$

Dans ce cas, on est protégé contre l'électrocution puisque I_{min} dangereux est supérieur à la valeur de 480 A trouvée précédemment, pour laquelle les fusibles interviennent en 0,2 s, durée mortelle de contact admise par les auteurs. Dans le présent cas, la durée de contact d'un individu avec le potentiel dangereux sera inférieure à cette limite et il n'y aura donc pas d'électrocution.

2^{me} cas — Résistances X et Y équilibrées et de faible valeur.

$$X = 1 \text{ ohm}$$

$$Y = 1 \text{ ohm}$$

On trouve de même R_e = 0,184 ohm

$$I_{\text{min dangereux}} = 625 \text{ A} > 480 \text{ A}$$

On est encore protégé comme dans le cas précédent.

3^{me} cas : cas réel de l'accident — Résistances X et Y déséquilibrées, ce qui était le cas dans le chantier sinistré et qui constitue d'ailleurs le cas le plus général. Nous prendrons pour X et Y les valeurs trouvées dans le chantier accidenté, à savoir X = 0,35 ohm (terre générale) et Y = 9,5 ohms (terre particulière).

On trouve par les formules précédentes (a) et (b) :

$$R_e = 0,196 \text{ A}$$

$$I_{\text{min dangereux}} = 272 \text{ A} < 480$$

Donc le potentiel sur le convoyeur blindé atteindra 50 V et il y aura danger d'électrocution lorsque la valeur du courant I de court-circuit sera comprise entre 272 et 480 A.

$$272 \text{ A} < I < 480$$

Si nous introduisons ces limites dans la formule vue précédemment :

$$I = \frac{U \times 0,9}{\sqrt{(R + R_1)^2 + (2\omega L_1 + \omega L_2)^2}}$$

dans laquelle U = 550 R = R_e R₁ = 0,216 et ωL₁ = 0,0605.

nous trouvons que, dans l'échelle des valeurs possibles de ωL₂, la plage dangereuse pour laquelle il y a danger d'électrocution est

$$0,81 \text{ ohm} < \omega L_2 < 1,61 \text{ ohm}$$

Rappelons que ωL₂ représente l'impédance de l'enroulement (ou partie d'enroulement) du moteur du panzer répartiteur dont le stator est à la masse.

Lorsque cette impédance tombe entre les limites ci-dessus, il y a risque d'électrocution (voir conclusions).

4^{me} cas — X et Y déséquilibrées, mais de valeurs faibles. Nous prendrons $X = 0,35$ ohm
 $Y = 1$ ohm

Nous trouvons

$$R_e = 0,17 \text{ ohm}$$

$$I_{\text{min dangereux}} = 398 \text{ A}$$

Donc, il y a encore risque d'électrocution lorsque $398 \text{ A} < I < 480 \text{ A}$ (voir conclusions).

On voit donc que l'adjonction locale d'une terre particulière n'améliore guère la protection.

L'étude qui précède nous conduit aux considérations suivantes :

1. Lorsqu'un défaut d'isolement s'établit sur une phase au contact d'une pièce métallique, la protection contre une électrocution est assurée, dans le cas d'un réseau d'extension limitée (moins de 6 km par exemple), si cette pièce est mise à la terre par une résistance de 10 ohms.

2. Lorsque deux phases présentent un défaut d'isolement, en des endroits différents d'un réseau à 550 V, et que l'un de ces défauts se produit au contact d'une pièce métallique non mise à la terre, il y a danger d'électrocution lorsque l'isolement général tombe à 10.000 ohms, si l'on admet 50 V comme tension dangereuse sur la pièce.

Si ladite pièce est mise à la terre par une résistance de 10 ohms, le danger subsiste lorsque la résistance d'isolement tombe à 100 ohms.

Si la pièce métallique est raccordée à un réseau de mise à la terre du siège, réseau constitué par un conducteur continu de masse reliant toutes les installations et raccordé à différents endroits à des prises de terre, il subsiste un danger d'électrocution lorsque le courant de court-circuit, qui s'établit entre les deux défauts par le conducteur de masse, se trouve compris entre deux valeurs qui délimitent ce qu'on peut appeler une plage dangereuse pour laquelle la tension mortelle de 50 V s'établit sur la pièce et dure plus de 0,2 s, temps nécessaire (pour un individu normal) à l'électrocution.

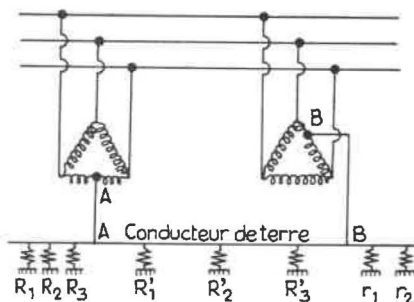


Fig. 9.

La situation générale du réseau et des prises de terre d'un siège est représentée à la figure 9. Si les

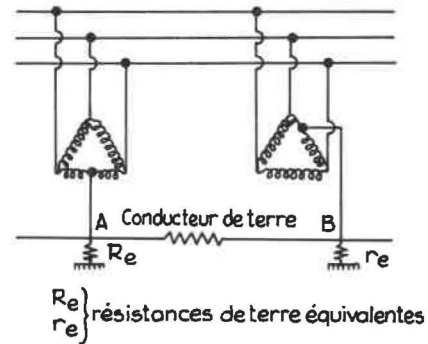


Fig. 10.

défauts d'isolement se produisent aux points A et B, on voit que la situation se ramène à celle étudiée pour le cas de l'accident par simple transposition des résistances des prises de terre aux points A et B (fig. 10).

Ces cas d'électrocution peuvent être supprimés par l'emploi d'un contrôleur d'isolement réglé pour provoquer le déclenchement immédiat du disjoncteur dès que l'isolement d'une phase tombe en dessous de 15.000 ohms par exemple.

Cette limite, supérieure aux différents seuils de danger cités plus haut, se justifie en tenant compte du risque d'aggravation rapide d'un défaut, lorsque l'isolement du réseau descend à une valeur moindre.

Toutefois, le seuil de déclenchement du contrôleur d'isolement nous paraît pouvoir être fixé à une valeur plus faible dans les cas où la certitude existe que tous les appareils sont convenablement mis à la terre.

En effet, le danger d'électrocution n'existe dans ces cas qu'à partir de valeurs très faibles (de l'ordre de la centaine d'ohms) de la résistance d'isolement. Le seuil de déclenchement pourrait alors être choisi à une valeur inférieure à celle de 15.000 ohms dite plus haut, par exemple 10.000 ohms, voire 5.000 ohms.

La certitude de la mise à la terre convenable des appareils à protéger implique, non seulement une résistance faible de mise à la terre, mais aussi la surveillance au moyen de relais, de la continuité des circuits de masse.

Il convient cependant de ne pas perdre de vue le risque d'électrocution par contact direct de l'homme avec une phase. Pour ce cas là, la fixation du seuil de déclenchement du contrôleur d'isolement à la valeur la plus élevée possible est souhaitable, la résistance effective de ce contact pouvant atteindre des valeurs nettement plus élevées que 1.000 ohms. Dans le même but, le temps de déclenchement au moyen de ce contrôleur d'isolement devrait être nettement inférieur à 0,2 s, temps minimum que certains auteurs estiment nécessaire à l'électrocution.

3. L'électrisation d'un convoyeur blindé dont les têtes motrices sont convenablement mises à la terre est encore possible si une phase du câble qui longe

Le convoyeur est mise à la masse de celui-ci à la suite d'une détérioration. La probabilité de ce cas n'est pas négligeable car les câbles, bien que placés dans des goulottes, peuvent être pincés par un pous-seur, ou le mouvement des tôles, ou une pierre, etc...

En raison de la forte résistance ohmique qui peut exister entre les tôles, un potentiel mortel peut s'établir sur une partie du convoyeur.

En l'absence de contrôleur d'isolement, on pourrait songer à assurer une mise à la terre continue de toutes les tôles au moyen d'un câble d'acier bou-lonné à chacune de celles-ci.

Toutefois, en cas de mise à la masse d'une seconde phase en un autre point du réseau, comme cela s'est produit lors de l'accident, cette solution présente le danger de répartir le potentiel maximum sur toute la longueur du convoyeur blindé et d'augmenter ainsi le nombre des victimes possibles.

Dans ces conditions, le remède au danger ne peut également être apporté que par un contrôleur d'isole-ment à déclenchement automatique.

Notons que le contrôleur d'isolement devrait être de construction et de conception particulièrement soignées et faire éventuellement l'objet d'une agréa-tion.

4. Les câbles souples doivent être pourvus actuel-lement, suivant le règlement belge, d'une gaine mise à la terre. Une telle gaine ne nous paraît assurer ef-ficacement la sécurité vis-à-vis d'une électrocution qu'à la condition que l'isolement du réseau soit sur-veillé par un contrôleur d'isolement à déclenchement automatique.

5. Nous avons admis, dans ce qui précède, 0,050 A comme courant d'électrocution, suivant les normes allemandes. Les normes françaises sont plus rigoureuses (0,025 A). Vraisemblablement compor-tent-elles un certain coefficient de sécurité. En em-ployant ces normes, la plage dangereuse déterminée plus haut serait tout simplement élargie, mais les conclusions concernant l'emploi d'un contrôleur d'isolement restent valables.

6. Il ne semble pas que la sécurité puisse être, dans le cas présent, notablement augmentée par l'in-termédiaire des appareils de protection tels que fu-sibles, contacteurs ou disjoncteurs existant actuelle-ment sur le marché.

Les fusibles utilisés fondent en 0,005 s sous 1.000 A, en 0,2 s sous 480 A, en 20 s sous 250 A.

Ce courant de 250 A représente la pointe de dé-marrage d'un moteur. Nous avons vu que, dans le cas étudié, ce courant a la valeur du courant de court-circuit minimum nécessaire à travers les 200 m de conducteur de masse pour appliquer au con-voyeur blindé la tension dangereuse de 50 V.

Dans le cas présent, le coffret à contacteurs possé-dait un relais thermique réglé à 50 A. La courbe de fonctionnement de ce relais donne ce qui suit :

Courant de 50 A - fonctionnement illimité
(courbe asymptotique)

Courant de 100 A - coupure après 3,5 min

Courant de 200 A - coupure après 0,6 min, soit 36 s

Courant de 300 A - coupure après 0,25 min, soit 15 s

Courant de 400 A - coupure après 0,1 min, soit 6 s

Dans le cas de l'accident, le courant de court-circuit qui a appliqué la tension dangereuse au con-voyeur blindé a eu pour valeur maximum possible :

$$\frac{550 \text{ V}}{9,85 \text{ ohms}}$$

soit 56 A ; cette valeur de courant est trop faible pour faire fonctionner le relais à maximum de cou-rant.

7. L'augmentation de la section du conducteur de terre ne peut être retenue comme solution. Certains réseaux desservis par une même sous-station com-portent en effet des moteurs séparés par des lon-gueurs de câbles de plus de 2 km. En supposant qu'une mise à la masse se fasse à chacun de ces mo-teurs, il faudrait, pour que la tension dangereuse ne puisse s'appliquer pendant plus de 0,2 s sur l'un de ces moteurs (durée minimum pour l'électrocu-tion), que le courant de court-circuit ait au moins la valeur de 480 A imposée par les caractéristiques des fusibles. Cela conduit à envisager une résistance de conducteur de terre d'environ 0,1 ohm, ce qui néces-siterait une section de ce conducteur de 340 mm², évidemment prohibitive.

Citations d'auteurs.

Bihl (Edition 1955, p. 183 — Electrification du fond des mines).

« Auparavant, nous attirons cependant encore l'attention sur le fait qu'un courant d'électrocution, pour être mortel, doit durer de l'ordre de 1/5 de seconde.

» D'où une première règle pratique de sécurité : avant de toucher franchement un appareillage élec-trique au fond, il convient de le tâter d'abord du bout des doigts : de la sorte la secousse nerveuse res-sentie en cas de mise à la masse fera probablement durer le passage du courant moins 1/5 de seconde ; en le touchant franchement (et surtout les poignées de commande), la crampe consécutive à l'électrocu-tion risque de prolonger la durée de contact au-delà de la valeur mortelle.

» Une autre conséquence découlant de ce facteur temps paraît être dévolue dans l'avenir à la rapidité des déclenchements de différents systèmes de sécu-rité. Alors que les relais électromagnétiques, même à réglage instantané, ont une inertie relativement im-portante, limitant au mieux les durées de fonctionne-ment à des durées de l'ordre de 0,2 seconde, les re-lais électroniques, s'ils peuvent s'introduire dans la

mine et s'ils peuvent opérer directement sans passer par le concours de relais électromagnétiques, ont des temps de déclenchement beaucoup plus courts qui sont de l'ordre de 0,01 seconde.

» Il semble qu'une amélioration de la sécurité électrocution pourrait être obtenue dans cette voie. »

Annales des Mines — Juin 1957 — Recommandation n^o 2

de la sous-commission Electricité de la Conférence Internationale sur la sécurité dans les mines de Luxembourg.

« a) Dans les réseaux sous tension supérieure à 660 V, le courant de mise accidentelle à la terre doit être aussi faible que possible, sinon il doit être limité à une valeur aussi faible que possible à l'aide de dispositifs appropriés.

» b) En cas de mise accidentelle à la terre, les conducteurs intéressés doivent être sans retard mis automatiquement hors tension ou tout au moins la mise accidentelle à la terre doit être signalée par un appareil indicateur.

» c) Pour les circuits sous tension entre 42 et 660 V, les mêmes dispositions sont applicables. Cependant, au lieu du simple appareil indicateur, on doit installer un appareil de mesure d'isolement avec un signal d'alarme optique et acoustique ; toutefois, pour les installations d'éclairage, un signal d'alarme optique est considéré comme suffisant.

» d) Le défaut d'isolement doit être au plus tôt recherché par le personnel qualifié et être réparé dans un délai convenable. Sinon, les conducteurs intéressés doivent être mis hors tension. »

Conclusions.

Le risque d'électrocution qui résulte de l'existence de défauts d'isolement en deux points différents d'un réseau à neutre isolé dépend moins des valeurs des résistances de mise à la terre de chacun de ces points que du déséquilibre qui peut exister entre les valeurs.

Il s'ensuit que la sécurité du personnel vis-à-vis du risque d'électrocution peut être obtenue par l'application des deux mesures suivantes.

1) Maintien en permanence de la résistance d'isolement du réseau protégé au-dessus d'une valeur minima, fixée d'avance et correspondant à la valeur admise comme seuil de danger. Cette mesure implique la surveillance de l'isolement au moyen d'un contrôleur d'isolement assurant le déclenchement immédiat du disjoncteur dès que l'isolement du réseau tombe sous cette valeur.

Pour tenir compte des nécessités de l'exploitation, un tel contrôle de l'isolement doit être sélectif et il paraît souhaitable, dans le même but, que le contrôleur d'isolement comporte, outre le seuil de danger à déclenchement immédiat, un seuil d'alerte fixé à une valeur plus élevée qui, lorsque le défaut d'isolement ne présente pas une évolution rapide, prévient du défaut et donne le temps à l'électricien de le rechercher et d'y remédier avant qu'il ne devienne nécessaire de mettre hors tension les installations.

2) Accroissement de la robustesse mécanique et de la protection des pièces ou des câbles sous tension au fond de la mine : la mise sur le marché de moteurs à boîte à borne encastrée est un exemple des améliorations qu'il est légitime d'escompter dans ce domaine.

Ces mesures renforcent, en outre, considérablement la sécurité des installations électriques vis-à-vis des risques d'incendie et d'inflammation de grisou.