

ÉLECTRICITÉ

Les dangers du courant alternatif basse tension

Contrairement à une opinion généralement admise, le courant alternatif n'est pas inoffensif aux basses tensions industrielles. Les statistiques officielles prouvent, au contraire, que les cas d'électrocution y sont fort nombreux et attirent l'attention sur la nécessité d'assurer une protection plus efficace contre un danger d'autant plus grand qu'il est très souvent ignoré.

Les règlements administratifs, aussi bien en France qu'à l'étranger, en classant au point de vue du danger les courants par catégories de tensions, ont contribué à répandre l'idée que toutes les tensions dites basses sont inoffensives. C'est une grave erreur, et on a même enregistré des cas de mort pour des tensions ne dépassant certainement pas 70 volts.

De nombreux travaux ont été effectués par différents savants pour déterminer le mode d'action du courant sur l'organisme. Bien que cette action physiologique soit encore assez mal connue, on admet généralement aujourd'hui que le courant provoque la paralysie et l'arrêt du cœur et détermine ainsi la mort.

L'étude de certains cas d'électrocution et des expériences récentes ont, d'autre part, montré que l'action sur l'organisme, aux fréquences industrielles bien entendu, est fonction de l'intensité et que, par conséquent, la tension n'agit qu'indirectement en contribuant à augmenter le courant qui traverse le sujet.

Il a été possible d'apprécier la valeur de l'intensité pour laquelle un courant devient dangereux. On peut la fixer aux environs de 25 milli-ampères (V Kammerer). En effet, bien que certains sujets particulièrement doués aient pu, dans certains cas, supporter près de 0.1 ampère, on ne doit considérer ces faits que comme des exceptions et admettre pour certain qu'un courant de 0.1 ampère à basse fréquence est toujours mortel. Il faut, d'autre part, tenir compte de la façon dont se fait la répartition dans le corps et de l'état du sujet. C'est ainsi que certains contacts obligeant le courant à passer en grande partie dans la région du cœur offriront beaucoup plus de danger et que certaines personnes, cardiaques, alcooliques ou en état de moindre résistance physique seront plus facilement électrocutées. Ces raisons montrent pourquoi il est prudent de fixer comme limite dangereuse une valeur assez basse et d'adopter le chiffre de 25 milli-ampères.

On peut tirer des observations précédentes une conclusion fort simple : c'est que le danger sera nul, quelle que soit la tension, si la personne qui touche un conducteur se place dans des conditions telles que la valeur du courant qui la traverse soit très inférieure à la valeur maxima indiquée plus haut. Pour un courant de quelques milli-ampères, elle sentira une secousse désagréable et pour un courant atteignant 25 milli-ampères, sa vie sera en danger.

Tous les dispositifs d'isolement n'ont d'ailleurs pas d'autre but que de limiter le courant passant à travers l'opérateur et l'ouvrier manœuvrant des sectionneurs sur la haute tension ne court aucun danger parce que la perche isolante qu'il tient introduit dans le circuit de son corps une résistance telle que le courant qui passe est à peu près nul.

Nous allons maintenant rechercher les conditions dans lesquelles un contact, soit bipolaire, soit unipolaire, aura pour

conséquence de faire passer dans le corps du sujet un courant dangereux. Ici intervient alors la notion de la résistance de contact, celle du courant de capacité et de la résistance d'isolement contre terre du réseau.

La résistance du contact est primordiale car, dans la résistance totale qu'offre le corps au passage du courant, c'est celle qui domine. Elle est extrêmement variable. Elle dépend de l'état de la peau et surtout de la grandeur de la surface par laquelle le contact s'établit. Des mains humides ou imprégnées de sueur diminuent cette résistance qui, d'autre part, est en raison inverse de la surface par laquelle s'établit le contact.

Le courant de capacité est le courant de fuite qui prend naissance dans tous les réseaux à courant alternatif par suite de la capacité propre de chaque phase par rapport à la terre. Sa valeur est donnée par la formule :

$$I = K C \omega U$$

dans laquelle K est un coefficient constant, C représente la capacité de la ligne par rapport à la terre, ω la pulsation du courant et U la tension du réseau. La personne qui touche une phase met la résistance constituée par son corps en parallèle avec la capacité de la ligne et un courant la traverse. La formule indique immédiatement qu'en courant continu ($\omega = 0$), il n'y a pas de courant de fuite et que le danger de contact est nul, quelle que soit la tension, si l'isolement est bon.

La résistance d'isolement a enfin une importance capitale puisque dans l'hypothèse du contact unipolaire, elle s'ajoute à celle du corps pour limiter le courant qui traverse ce dernier.

1° CONTACT BIPOLAIRE. — Dans ce cas, le courant traversant le sujet est uniquement limité par la résistance de son corps. Or, nous venons de voir que cette dernière est très variable et dépend de plusieurs circonstances, en particulier de la surface des contacts et de l'état de la peau aux points de contact. Elle peut facilement varier de 1 à 10 et ceci nous explique pourquoi un ouvrier peut trouver la mort là où d'autres ont à peine senti une secousse désagréable. De toute façon, si la résistance tombe à 5.000 ohms, et c'est le cas lorsque le contact se fait à pleines mains, celles-ci étant un peu moites, l'accident mortel aura lieu pour une tension U telle que

$$\frac{U}{5000} = 0.025 \text{ soit } U = 125 \text{ volts}$$

2° CONTACT UNIPOLAIRE. — C'est le cas le plus fréquent, celui qui intéresse plus particulièrement le personnel non spécialiste.

En courant continu, si l'on a affaire à un réseau parfaitement isolé, il ne peut y avoir passage de courant, l'effet de capacité n'existant pas, comme nous l'avons vu précédemment. Un tel contact est donc théoriquement inoffensif, quelle que soit la tension et le point A du réseau est simplement mis au potentiel de la terre par l'intermédiaire du sujet (fig. 1). Pratiquement, l'isolement n'est pas parfait et les résistances d'isolement de chacune des lignes par rapport à la terre sont respectivement R_2 et R_3 . Si R_1 est celle du corps et que nous appelons R la résistance correspondante à R_1 et R_2 ($R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$)

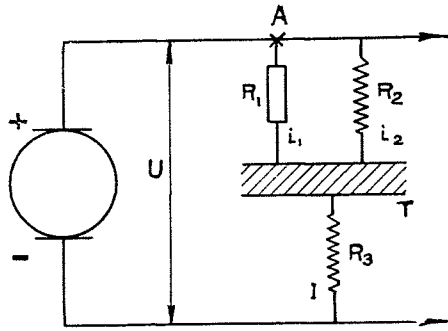
le courant de fuite aura pour valeur :

$$I = \frac{U}{R + R_3}$$

et le courant traversant le sujet :

$$i_1 = i_2 \frac{R_2}{R_1}$$

Il sera d'autant plus important que R_2 sera plus grand et, ce qui



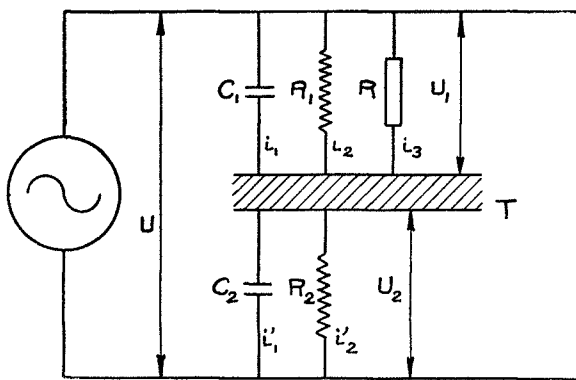
$$I = i_1 + i_2$$

Fig 1

est évident *a priori*, nul si la phase que l'on touche est à la terre ($R_2 = 0$).

En courant alternatif, les choses se passent différemment. En admettant même un réseau parfaitement isolé, le courant de fuite n'est pas négligeable en raison de la capacité et il aura pour valeur : $I = K C \omega U$.

Pour une fréquence de 50 périodes, cette valeur n'est jamais négligeable pour des réseaux quelque peu étendus. Elle varie proportionnellement à la tension et comme avec celle-ci augmente en même temps l'importance des réseaux, on trouvera des cas où le courant de capacité est de l'ordre de plusieurs ampères, pouvant même atteindre et dépasser, s'il s'agit de longues lignes, la valeur de 10 ampères. Pour des réseaux d'usines en basse tension, il est souvent de l'ordre de quelques milli-ampères, à moins que la présence de câbles armés ne vienne augmenter sensiblement C. La personne qui touchera un pôle placera la résistance de son corps R en parallèle avec la résistance d'isolement de la ligne R_1 et sa capacité C_1 (fig. 2) Le courant qui



Géométriquement, courant de fuite $(=) I (=) i'_1 (+) i'_2 (=) i_1 (+) i_2 (+) i_3$

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{C_2^2 \omega^2}}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R R_1}{R + R_1}\right)^2 + \frac{1}{C_1^2 \omega^2}}}$$

Fig. 2

passait primitivement par la terre était fonction de la tension U entre phases, des résistances d'isolement, des capacités des lignes et avait pour valeur simplement $I = C \omega U$ dans le cas d'un isolement parfait. A la suite du contact en A, une partie se dérivera dans le corps de la personne et son importance sera fonction des constantes des circuits. En particulier, si $R_1 = 0$ (cas d'une phase à la terre), le courant passant par R sera nul et on pourra toucher A impunément. Si R_1 est infini (isolement parfait et C_1 très petit, le contact ne sera plus dangereux, car le courant total lui-même sera très faible.

En triphasé, si les trois phases ont, par rapport à la terre la même capacité et sont également isolées, c'est un système équilibré que l'on a, la point neutre étant la terre et représentant si l'on veut le potentiel 0 (fig. 3). Si l'on place alors entre phases

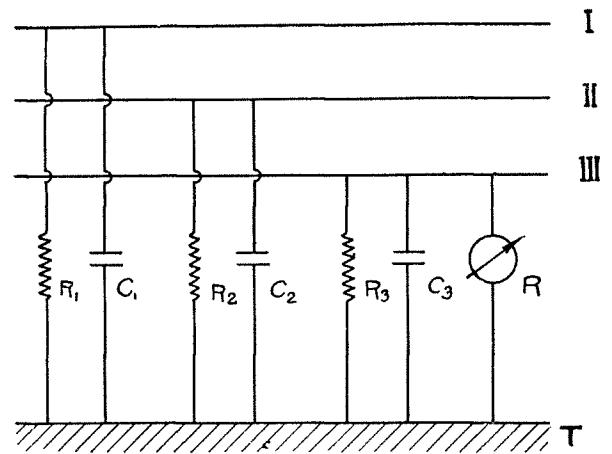


Fig. 3

et terre un voltmètre de résistance intérieure R assez forte pour ne pas entraîner de perturbation dans la répartition du courant de fuite, son aiguille déviara et accusera une tension qui sera la tension simple. La déviation sera la même pour les trois phases.

Supposons maintenant que sur chaque phase, il y ait des défauts d'isolement de résistances respectives R_1, R_2 et R_3 . Dans ces conditions, le voltmètre n'accusera plus des déviations identiques, le circuit n'étant plus équilibré. Les tensions U_1, U_2, U_3 de chaque phase contre terre ne seront plus les mêmes. Dans le cas où $R_1 = 0$, on a $U_1 = 0$ et la tension composée s'établit entre les autres phases et la terre.

Donc, si en reliant les bornes d'un voltmètre approprié, d'une part à chacune des phases et, d'autre part, à la terre, on n'observe pas de déviation ou des déviations insignifiantes, c'est que le courant de capacité est très faible et que l'isolement est bon sur les trois phases. Si, par exemple, l'appareil dévie de toute graduation pour 50 milli-ampères et que l'aiguille s'arrête dans l'essai au 1/10^e de cette graduation, le courant traversant l'appa

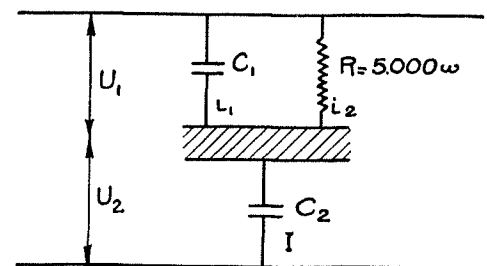


Fig. 4

reil est de 5 milli-ampères seulement et comme il représente une fraction importante du courant total I, ce dernier est donc peu important (fig. 4).

Dans le cas où les déviations sont très différentes, il y a lieu d'incriminer les défauts d'isolement, la phase provoquant la déviation la plus forte étant la mieux isolée.

Un simple voltmètre, de résistance intérieure de l'ordre de quelques milliers d'ohms (2 à 5) permet donc de se livrer à des investigations intéressantes sur un réseau basse tension en service et permet d'apprécier en même temps le danger du contact.

On peut même aller plus loin et substituer entièrement le voltmètre à la personne susceptible d'entrer en contact avec une phase. Nous avons vu précédemment qu'il fallait considérer comme limite dangereuse du courant la valeur de 25 milli-ampères. Or, de nombreuses expériences ont permis d'apprécier la valeur minima de la résistance du corps humain dans les conditions les plus défavorables. On peut la fixer à environ 2 000 ohms.

Supposons donc que nous ayons à notre disposition un voltmètre de 2.000 ohms gradué de 0 à 100 volts. Il donnera sa déviation totale pour un courant de

$$\frac{100}{2.000} = 0.05 \text{ milli-ampère}$$

Si cet appareil dévie de 50 divisions, le courant qui le traversera sera de 25 milli-ampères, représentant la limite dangereuse. Nous avons donc là un moyen pratique pour nous rendre compte si, sur un réseau déterminé, un contact est dangereux pour un sujet présentant une résistance de 2.000 ohms. Cette faible résistance ne peut être atteinte que dans des cas tout à fait exceptionnels, mais alors la tension mortelle est très faible :

$$2.000 \times 0.25 = 50 \text{ volts.}$$

En fait, plusieurs accidents mortels ont eu lieu à des tensions peu supérieures à cette dernière et, en tous cas, inférieures à 80-90 volts. On les observe dans les endroits où le sol est rendu très conducteur soit par l'humidité, soit par la présence de corps eux-mêmes très conducteurs (sels, acides, etc.), et lorsque le sujet a le corps imprégné de sueur ou d'humidité et les chaussures humides

La présence de pièces métalliques reliées à la terre par des tuyauteries d'eau qui constituent une résistance pratiquement nulle est éminemment favorable à l'électrocution (chaudières, réservoirs métalliques, etc.) Il est évident, par exemple, que même à 50 volts, il serait extrêmement dangereux de toucher de son bain une pièce sous tension. Au contraire, avec des chaussures sèches et à condition de ne toucher que du bout des doigts, on peut impunément établir le contact avec une ligne à 500 volts ou même davantage.

Quoi qu'il en soit, nous voyons par cet aperçu que si le danger du courant alternatif basse tension est certain, les cas d'électrocution ne peuvent se produire que dans certaines circonstances spéciales faciles à prévoir d'après l'état des réseaux et des lieux. Il est toujours possible d'y parer par l'un ou l'autre des moyens suivants :

1° DIMINUTION DU COURANT DE CAPACITÉ DES RÉSEAUX. — Il est à remarquer que la plupart des accidents en basse tension sont provoqués par des contacts unipolaires sur des lignes de réseaux d'éclairage. Avec des réseaux étendus, il est très difficile d'obtenir un bon isolement et bien que cette condition soit remplie, le courant de capacité qui persiste rend les contacts dangereux. A ce point de vue, il est donc intéressant de multiplier le nombre des transformateurs et, en particulier, de séparer les réseaux de force et d'éclairage, solution qui présente d'autres

avantages en ce qui concerne la régularité de la tension pour l'alimentation des lampes.

Si le courant de capacité ne dépasse pas quelques milli-ampères, un contact unipolaire sur un réseau bien isolé ne sera jamais dangereux quelles que soient les conditions dans lesquelles il s'établit. D'où l'intérêt de limiter la puissance des transformateurs d'éclairage et de multiplier les interrupteurs bipolaires qui permettent, quand une ligne n'est pas en service, de l'isoler complètement et, par suite, de diminuer un peu le courant de capacité.

2° AUGMENTATION DE L'ISOLEMENT. — La personne touchant un conducteur sous tension met en série avec elle la résistance d'isolement du réseau (fig.5) Le courant qui la traverse, abstraction

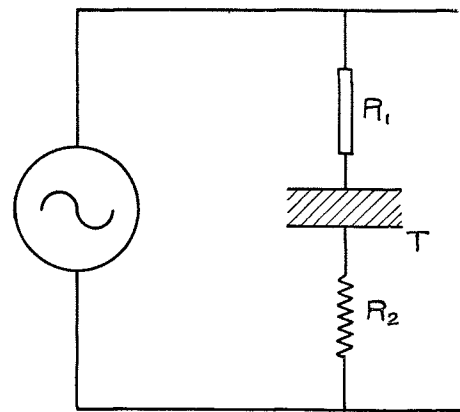


Fig. 5

tion faite du courant de capacité et de la résistance contre terre de la phase qu'elle touche est :

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

R_1 étant sa résistance propre, R_2 celle de l'isolement et de l'autre phase. Si R_2 est infini, elle ne court aucun danger, toujours à condition que le courant de capacité soit faible. Si R_2 devient nul (phase à la terre), le courant n'est plus limité que par la résistance du corps et elle se trouve ainsi dans la condition la plus défavorable, celle du contact bipolaire. L'importance de l'isolement est donc primordiale.

3° EMPLOI D'UNE TENSION TRÈS RÉDUITE — Un moyen radical pour éviter les accidents est d'adopter une tension telle que l'intensité qu'elle fera passer dans le corps ne puisse jamais atteindre, dans les cas les plus défavorables, une valeur dangereuse. Etant donné que la résistance minima du corps ne peut que très rarement descendre au-dessous de 2 000 ohms, il faut une tension de 50 volts pour que le courant atteigne 25 milli-ampères. En s'arrêtant, par exemple, à 30 volts, on est certain de supprimer tout danger. Cette solution s'impose dans tous les endroits où le sol est rendu très conducteur et où il est difficile d'obtenir un bon isolement. L'emploi de l'auto-transformateur est à rejeter car, si, par exemple, un défaut s'établit au primaire sur la phase A (fig. 6), la tension sur le réseau à 30 volts monte à 200 volts contre terre. Cette solution pourrait être acceptée à la rigueur à condition de mettre résolument la phase B à la terre.

4° MISES A LA TERRE. — Les défauts d'isolement des lignes et des appareils ont très souvent, pour conséquence, de mettre sous tension, les pièces métalliques qui les entourent (supports, cofrets, etc.), et la personne qui touche à ces ferrures peut se faire

électrocuter. Les contacts sont d'autant plus dangereux qu'ils se font généralement à pleines mains. Pour éviter les accidents, la mise à la terre des pièces métalliques non parcourues par le courant, mais susceptibles d'être portées accidentellement à la tension du réseau est nécessaire, même en basse tension, bien

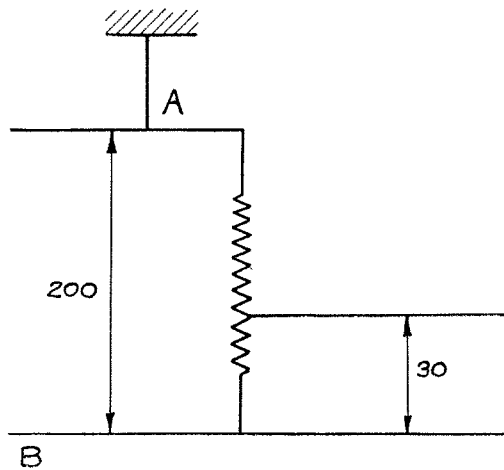


Fig. 6

qu'elle ne soit pas rendue obligatoire par les règlements administratifs. Elle s'impose dans tous les locaux où le sol est conducteur.

Il importe, ici, d'ouvrir une parenthèse et de signaler le très grave danger qu'offrent les perceuses à main. Alimentées trop souvent par des câbles en mauvais état, pouvant présenter des défauts, elles sont susceptibles de se mettre à la masse. L'ouvrier qui s'en sert les tenant à pleines mains, réalise un très bon contact et nous avons vu plus haut que dans ces conditions, la tension dangereuse est extrêmement faible. Le danger d'électrocution est donc très grand. Pour y parer, il est indispensable que chaque perceuse ait sa masse mise à la terre par un conducteur spécial.

La résistance de la prise de terre ne doit pas dépasser, dans chaque cas particulier, une certaine valeur si l'on veut que son efficacité soit certaine.

Supposons, par exemple, un réseau triphasé bien isolé. La mise sous tension d'une ferrure par contact avec une phase ne donnera lieu à aucun accident d'exploitation mais la tension contre terre montera à $U/\sqrt{3}$ sur les deux autres phases où les dangers de contact seront accrus. Si le réseau est mal isolé et a déjà un défaut franc sur une autre phase, il y a court-circuit limité seulement par la résistance de la prise de terre.

En supposant un réseau à 200 volts, le courant de court-circuit sera de 10 ampères seulement si la résistance de la prise de terre est de 20 ohms. La surintensité de 10 ampères qui en résultera n'aura pas toujours pour conséquence le fonctionnement des appareils de sécurité et la tension dangereuse risque de se maintenir sur la ferrure à la valeur $IR = 10 \times 20 = 200$ volts, par rapport à la terre. Le danger subsiste.

Ce cas se présente fréquemment avec de gros moteurs. Soit, par exemple, un moteur de 100 chevaux à 200 volts, dont le coffret est à la masse. Même si la prise de terre de ce coffret n'a que 10 ohms de résistance, il est douteux que le courant de 20 ampères qu'elle laissera passer en plus du courant normal soit suffisant pour assurer le fonctionnement des fusibles ou du disjoncteur. La personne touchant alors le coffret de protection pourra fort bien se faire électrocuter, la tension se maintenant à 200 volts. Il est donc nécessaire d'avoir une prise de terre d'autant mieux établie que la puissance du moteur est plus élevée, toutes choses égales d'ailleurs. En cas de fonctionnement intempêtif des disjoncteurs ou fusibles, il faut d'autre part se méfier et ne toucher qu'après s'être isolé. Enfin, il vaut mieux, si l'on n'est pas certain de pouvoir réaliser une prise de terre satisfaisante, prévoir pour la personne chargée de manœuvrer des interrupteurs ou coffrets, une isolation quelconque (tabouret, tapis, gants, etc.), la mise à la terre ne constituant qu'un supplément de sécurité.

Notons ici qu'à ce point de vue les tensions élevées sont préférables, car elles ont, pour conséquence, de faire passer dans la prise de terre un courant de court-circuit plus fort alors qu'elles diminuent le courant normal traversant les appareils. Notons également l'intérêt qu'il y a à munir les trois phases, dans tous les disjoncteurs, d'un relai à maximum d'intensité, si l'on veut dans tous les cas être protégé contre les mises à la terre.

Si l'il n'y a pas d'autre défaut sur le réseau, la prise de terre joue un rôle efficace, même quand sa résistance est élevée, à condition toutefois que le courant de capacité soit assez faible. Si ce dernier atteint 5 ampères et que l'on se fixe 50 volts comme tension dangereuse, la valeur de la résistance est déjà trop forte à 10 ohms. Ce cas ne se présente heureusement jamais dans les réseaux à basse tension. Il intéresse surtout les réseaux à très haute tension ayant une certaine étendue pour lesquels la mise à la terre des ferrures et des pylônes en particulier doit être réalisée avec beaucoup de soin, la résistance limite de la prise de terre variant en raison inverse du courant de capacité.

En résumé, le danger du contact avec une pièce sous tension ne dépend pas seulement de la valeur de cette tension, mais d'une foule d'autres circonstances très variables, suivant les cas, et qui font qu'un contact à 1.000 volts pourra n'avoir aucune suite fâcheuse alors que, peut-être, un autre à 100 volts sera mortel, si les circonstances sont favorables. Ce qu'il faut retenir toutefois, c'est qu'il y a une tension pour laquelle, en aucun cas, le courant traversant le corps ne saurait être dangereux. Cette tension est de l'ordre de 30 volts. Il y aura donc intérêt, dans nombre de cas, et en particulier lorsque les autres conditions de sécurité ne pourront être obtenues, à l'adopter.

L'établissement de prises de terre judicieuses et surtout le bon entretien des lignes, assurant un bon isolement, sont à un autre point de vue les principaux facteurs de sécurité. Quant à la mise à la terre directe du point neutre dans les transformateurs triphasés, elle est, à notre avis, à rejeter car, dans la grande majorité des cas, elle augmente les dangers de contact.

DESCHAVANNES.