

aujourd'hui à peu près 2 millions de tonnes dont 300 000 viennent en France, la consommation s'en accroît chaque année et, malgré les évaluations les plus optimistes sur la richesse des gisements du Chili, on doit reconnaître qu'un jour viendra inévitablement où ils seront épuisés. D'ici là, les demandes croissantes de l'agriculture détermineraient fatalement une hausse d'autant plus regrettable que le produit devient sans cesse plus nécessaire si la fabrication synthétique n'arrivait pas juste à point pour atténuer une crise aussi fâcheuse. Les industriels qui auront su diriger de ce côté les ressources de la houille blanche doivent donc trouver dans cette voie les plus précieux encouragements et l'on ne peut que souhaiter à nos compatriotes d'y suivre hardiment leurs collègues scandinaves.

Grenoble, décembre 1910.

R. DE LA BROUSSE.

## DISTRIBUTIONS D'ÉNERGIE

### ACCIDENTS DUS AUX SURTENSIONS ET AUX COURTS-CIRCUITS DANS LES USINES ET RÉSEAUX

Rapport de M. LEGOUZ à la 1<sup>re</sup> section du Comité de la *Société Internationale des Electriciens*. (Seance du 6 juillet 1910).

Le développement considérable qu'ont pris, depuis quelques années, la puissance des unités et des usines génératrices, la vitesse de rotation des alternateurs commandés par turbines à vapeur, l'extension des réseaux de distribution haute tension tant souterrains qu'aériens, ont fait apparaître une série de phénomènes nouveaux, dont ont à souffrir les exploitants et que les constructeurs, malgré toute leur science, n'ont pu prévoir, faute d'une expérience suffisamment longue, pour leur permettre de connaître et la technique de ces phénomènes et les mesures à prendre, sinon pour en éviter le retour, tout au moins pour en limiter les effets.

Les constructeurs de machines à vapeur ont eu à lutter contre des difficultés analogues quand ils ont augmenté la puissance des machines et des chaudières, la pression de la vapeur, la longueur et la complication des tuyauteries de vapeur. Eux aussi ont eu des accidents, se sont trouvés en présence de problèmes nouveaux et imprévus qui n'ont été résolus qu'avec le temps, une longue expérience et surtout la collaboration de puissantes associations comme les Sociétés d'industriels de Mulhouse.

Votre première section a cru qu'il était de son devoir d'essayer de jouer un rôle analogue pour l'industrie électrique, dont le développement infiniment plus rapide que celui de la construction des machines à vapeur se heurte fréquemment à de nouvelles difficultés et soulève de nouveaux problèmes. C'est dans cet esprit et dans ce but qu'elle a abordé l'enquête dont le libellé vient d'être rappelé.

Elle a déjà reçu d'assez nombreux renseignements, et je crois être l'interprète de la première section et de tout le Comité en exprimant sa gratitude aux exploitants et industriels qui ont bien voulu la documenter et qui ont compris, suivant l'expression de l'un d'eux, que le remède aux accidents qui se produisent « ne pourra se trouver que dans une collaboration très sincère des intéressés ».

Parmi ces renseignements, il en est une catégorie qui, par la netteté, et l'on peut dire l'uniformité des phénomènes,

permet d'ores et déjà d'en bien faire ressortir les causes, d'en suivre le développement et les effets : il s'agit de la répercussion sur tout un réseau d'une surtension provoquée par un accident très localisé.

La Commission a estimé qu'il serait utile de faire connaître ce qu'elle savait déjà sur ce point important et elle espère que l'exposé qui va en être fait provoquera de nouvelles communications et surtout incitera les plus autorisés de nos collègues à chercher le remède à un mal nettement défini.

Quelques exemples les plus typiques des accidents, sur lesquels des renseignements ont été fournis, vont montrer quel est l'état de la question et le problème à résoudre.

*Premier exemple.* — Ce premier exemple a été choisi parmi les plus simples. Il s'agit d'un réseau à 10 250 volts, triphasé, 25 périodes. Au moment de l'accident, des alternateurs en parallèle sur le réseau pouvaient ensemble développer une puissance de 10 000 à 12 000 kilowatts.

L'un des feeders A branché sur les barres principales subit une avarie à quelques centaines de mètres du tableau. Par suite du défaut, l'une des phases du câble avarié fut mise à terre, ce qui eut comme conséquence de développer des surtensions sur les autres phases, dont l'effet se fit sentir sur les autres feeders reliés aux barres du tableau alimentant le câble avarié. Cet effet fut particulièrement sensible sur une phase d'un certain feeder B.

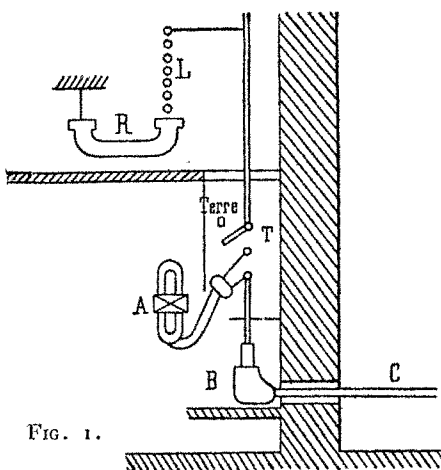


FIG. 1.

LÉGENDE. — C, câble. — B, boîte d'extrémité. — A, réducteur d'intensité. — T, couteau de mise à la terre. — L, limiteur de tension. — R, résistance liquide.

La figure 1 est un schéma de l'installation d'une phase du feeder B.

Sur chaque phase est branché en dérivation un limiteur de tension, composé de rouleaux en bronze à 24 intervalles ; en série avec ce limiteur, est placée une résistance liquide, composée d'un tube en U rempli d'eau distillée ; cette résistance est elle-même reliée à une barre de terre commune à tous les feeders.

À l'étage inférieur se trouve d'abord un couteau de mise à la terre, puis un réducteur d'intensité et enfin la boîte d'extrémité à laquelle est raccordé le feeder. Les avaries constatées étaient les suivantes :

Le limiteur de tension était en partie brûlé ; la résistance liquide, placée en série avec ce limiteur, était vide ; l'eau qui la remplissait avait été projetée avec violence en dehors du tube en U. Ces diverses avaries indiquent qu'il était par le limiteur un débit important, qui avait échauffé la résistance liquide, l'avait amenée à l'ébullition ; l'ébullition était bientôt devenue violente, et l'eau avait été projetée en dehors du tube en U ; ce qui avait coupé la communication avec la terre.

Une seconde série d'avarie montre nettement quelle nouvelle liaison avec la terre s'était établie sous l'action de la surtension, après la mise hors de service du limiteur de tension.

Un arc avait sauté, à l'étage inférieur, entre le couteau de mise à la terre et le ciment armé constituant les séparations

des différentes phases. Il existait, sur la plaque de ciment armé, un trou de 5 à 6 cm. de largeur sur une profondeur de 8 à 10 mm. Les tiges de fer constituant l'armature du ciment armé, avaient été mises à nu au fond de ce trou, mais ne portaient pas trace de brûlure.

On peut remarquer en passant que l'arc avait dû franchir, pour atteindre la plaque de ciment armé, un intervalle d'air de 12 cm. au moins. On s'explique difficilement pourquoi il s'est produit dans cette direction, alors que le plot de mise à la terre semblait offrir un chemin plus direct et plus résistant. Mais il s'agit là d'un phénomène secondaire sur lequel il y a d'autant moins lieu d'insister qu'il est fréquent que les arcs suivent les chemins les plus imprévus et les plus déconcertants.

L'exemple qui vient d'être donné est remarquable par sa simplicité et révèle, sans ambiguïté, que les surtensions se produisant sur un feeder peuvent agir sur un autre feeder relié aux mêmes barres.

*Deuxième exemple.* — Ce point bien établi, on peut aborder un second exemple un peu plus complexe, où plusieurs câbles et l'alternateur lui-même sont intéressés. Il s'agit encore d'un réseau à 10 250 volts, 25 périodes ; le débit était de 5 000 à 6 000 kw. environ.

Pour plus de clarté, les trois phases seront distinguées par la dénomination de phases blanche, rouge et bleue, et les trois feeders intéressés par les lettres A, B et C.

Voici tout d'abord un exposé des faits : Deux violentes déflagrations, accompagnées de lueurs intenses venant du tableau de distribution, se produisirent à deux ou trois secondes d'intervalle. A la seconde déflagration, l'interrupteur du câble A déclancha en même temps que celui de l'alternateur. Une visite immédiate permit de constater les phénomènes suivant :

1° Sur le câble A, l'interrupteur était déclenché, comme il vient d'être dit, sans autres dégâts ;

2° Sur le câble B, le limiteur de tension de la phase *blanche* avait fonctionné. Les rouleaux de ce limiteur étaient en partie fondus, et soudés les uns aux autres. L'eau contenue dans la résistance liquide placée en série avec ce limiteur avait été projetée violemment en dehors du tube en U, dans lequel il ne restait plus que quelques millimètres d'eau les électrodes ne plongeant plus dans le liquide.

3° Du côté des appareils de protection de l'alternateur, non seulement l'interrupteur était déclenché, mais, en outre, un limiteur hydraulique à jet d'eau, placé sur la phase *rouge*, s'était vidé brusquement, et l'eau avait été projetée sur les isolateurs placés au-dessus, à une distance d'environ 1<sup>m</sup>50.

Rien d'anormal n'étant signalé dans les sous-stations, la tension fut rétablie progressivement sur tous les câbles enclenchés avant l'accident, sauf sur le câble A dont l'interrupteur avait déclenché. Aussitôt après cette remise en tension, les limiteurs de tension de presque tous les feeders enclenchés donnaient lieu à des décharges inquiétantes sur les phases *rouge* et *blanche*.

Un court-circuit qui se produisit quelques instants après sur un troisième câble C expliquait les divers phénomènes constatés et y mettait fin. On reconnut plus tard que ce câble était avarié, et sectionné dans son parcours en tranchée.

Dans ce second exemple, on constate tout d'abord, comme dans le premier, le phénomène de répercussion des avaries du câble C sur les appareils de protection des autres câbles :

interrupteur du câble A, limiteur de tension de la phase *blanche* du câble B, limiteurs de tension des phases *blanche* et *rouge* de la plupart des câbles reliés aux barres principales. Le phénomène nouveau, c'est le déclenchement de l'interrupteur de l'alternateur et la mise hors service du limiteur hydraulique de la phase *rouge* de cet alternateur.

Ces accidents complémentaires s'expliquent par le débit considérable créé par la surtension, qui avait été assez important pour porter à l'ébullition et vider le limiteur hydraulique à jet d'eau. On verra plus loin la valeur considérable que peut atteindre le débit d'un courant de cette nature dans un accident où des appareils enregistreurs ont permis de connaître ce débit avec une grande exactitude.

*Troisième exemple.* — Dans le troisième exemple, la surtension s'est fait sentir dans une sous-station éloignée et non plus seulement sur les appareils directement reliés aux barres du tableau de l'usine génératrice. Les alternateurs triphasés 10 250 volts, 25 périodes, reliés aux barres principales, pouvaient débiter 10 à 12 000 kw. Les phases seront toujours distinguées en phases blanche, rouge et bleue ; les quatre câbles intéressés seront désignés par les lettres A, B, C et D, et la sous-station par la lettre S.

Voici les faits : l'accident débute, comme dans l'exemple précédent, par le déclenchement de l'interrupteur du câble A, avec détonation. Puis un nouveau court-circuit se produit, et l'on constate, lorsqu'on peut accéder au tableau, les dégâts suivants :

1° Sur le câble A, dont l'interrupteur a déclenché, les limiteurs de tension des phases *rouge* et *blanche* sont avariés : les rouleaux sont fondus et soudés ensemble ; le métal en fusion a été projeté jusque sur les barres principales. Un arc a sauté sur les supports métalliques des limiteurs des mêmes phases. En outre, l'eau de la résistance liquide de la phase rouge a été portée à l'ébullition et projetée sur le sol ; cette eau est encore bouillante.

2° Sur le câble B, le limiteur de tension de la phase *rouge* est brûlé, et l'eau de la résistance liquide répandue sur le sol. En outre, un fort coup de feu s'est produit entre les trois phases et la terre, aux couteaux situés immédiatement avant la boîte d'extrémité.

3° A la sous-station S, reliée par le câble C aux barres de l'usine, les limiteurs placés sur les phases *rouge* et *blanche* ont fonctionné ; l'eau des résistances liquides s'est échauffée ; la résistance ohmique en série avec les limiteurs a diminué, et le débit est devenu suffisant pour produire la fusion des rouleaux et déterminer un arc qui a sauté sur les parties métalliques, supportant les limiteurs et reliées à la terre générale par des fils de cuivre nu de 35/10 de diamètre. Ces fils ont fondu ; mais il résulte de leur inspection que leur fusion\* a été occasionnée plutôt par l'arc que par l'échauffement dû à une trop grande intensité. Ils ne sont pas, en effet, recuits sur toute leur longueur, alors que certains points sont fondus.

Cet accident a été dû à la surtension causée dans les phases rouge et blanche par la mise à la terre de la phase bleue d'un câble D, sans qu'il y ait eu de débit dangereux. Cette mise à la terre de la phase bleue a été déterminée par l'enfoncement d'un poinçon dans le câble D, par un ouvrier occupé à faire un branchement de gaz.

Le tableau ci-après résume les incidents signalés dans les trois exemples, et permet de voir rapidement la succession des phénomènes qui viennent d'être exposés en détail :

## PREMIER EXEMPLE

Câble A. Défaut sur une phase.	Câble B. Sur une autre phase. Limiteur de tension fondu. Résistance liquide en série vidée. Arc amorcé sur une cloison en ciment armé.
-----------------------------------	--

## DEUXIÈME EXEMPLE

Câble C Avarié et sectionné.	Alternateur. Phase rouge. Déclenchement de l'interrupteur Limiteur à jet d'eau vide.	Câble A. Déclenchement de l'interrupteur	Câble B. Phase blanche. Limiteur de tension fondu. Résistance liquide en série vidée.
---------------------------------	---	---	--

## TROISIÈME EXEMPLE

Câble D. Phase bleue Mise à la terre sans grand débit	Câble A. Phases rouge et blanche. Déclenchement de l'interrupteur Limiteurs de tension fondus, rouge et blanc. Résistance liquide en série rouge vidée. Arc sur les supports des limiteurs rouge et blanc.	Câble B. Phase rouge. Limiteur de tension fondu Résistance liquide en série vidée Fort coup de feu entre les trois phases et la terre.	Sous-station S. Câble C. Phases rouge et blanche. Limiteur de tension fondu.
---	---	--	---

*Quatrième exemple.* — Le quatrième exemple est pris sur un réseau haute tension de 100 km., qui débite au moment de l'accident environ 2 500 kw. sous 5 000 volts triphasés.

Un court-circuit entre les trois phases et la masse s'est produit dans un manchon de jonction d'un câble haute tension, par suite d'une poche d'eau. La chaleur dégagée à ce moment fit probablement fondre la matière isolante, et assura ainsi un isolement suffisant pour supporter la tension. Peu à peu l'isolement diminua, et le court-circuit se reproduisit plusieurs fois ; finalement, le défaut persista d'une façon constante. Ces courts-circuits successifs produisirent une surtension considérable, dont l'effet se fit sentir dans tout le réseau.

Les principaux désordres signalés furent les suivants :

- 1° Nombreux coups de feu dans un poste de transformateurs ;
- 2° Une boîte d'extrémité d'un câble s'est ouverte et une phase s'est mise à la terre ;
- 3° Un disjoncteur, dont les bobines de déclenchement étaient directement sur la haute tension, subit des coups de feu ; les bobines sont détériorées et mises à la masse ;
- 4° Un transformateur voisin du lieu d'accident eut une galette avariée sur une phase ;
- 5° Des limiteurs de tension fonctionnèrent, quoique éloignés de plusieurs kilomètres du câble avarié ;
- 6° Ce genre d'accident se produisit notamment dans une sous-station, bien que les ampèremètres branchés sur le câble la reliant à l'usine génératrice n'aient indiqué aucun débit appréciable.

On retrouve dans cet exemple des effets de même nature que dans les précédents ; la propagation d'une surtension locale sur tout un réseau ressort avec une netteté frappante.

*Cinquième exemple.* — L'usine génératrice, d'une puissance d'environ 5 000 kw., se compose d'alternateurs tournant à la vitesse de 1 500 tours à la minute, et débite du courant triphasé 50 périodes 6 300 volts. Une partie du réseau est alimentée à 15 000 volts par des transformateurs stationnaires.

On n'a pas eu à constater d'accidents dans les machines protégées par des automatiques. Mais il s'est produit sur le réseau en cours d'exploitation de multiples incidents : déclenchements intempestifs d'automatiques, courts-circuits anormaux et surtout effets anormaux de courts-circuits accidentels.

Chaque rupture de phase et chaque court-circuit dans le réseau à 15 000 volts est accompagné de fortes surtensions ; chaque mise à la terre d'une phase de ce réseau entraîne un court-circuit par l'apparition d'autres terres en des points que rien ne peut faire considérer comme faibles.

Les courts-circuits dans le réseau à 6 300 volts ou dans celui à 15 000 volts ont, au point de vue de la chute de tension à la Centrale, des effets qui semblent dépendre beaucoup de la zone où ils se produisent.

Les limiteurs de tension à intervalles multiples fonctionnent violemment sur chacune des trois phases ; lorsqu'il s'est produit une rupture de phase, le limiteur de tension de cette phase fonctionne très violemment avant de se mettre à repos ; les limiteurs des deux autres phases continuent à fonctionner avec une certaine activité, par suite de l'augmentation de potentiel par rapport au sol.

Dans ces divers cas, rupture de phase, court-circuit, mise à la terre d'une phase, il arrive parfois que les tubes des résistances liquides en série soient brisés sur les trois phases.

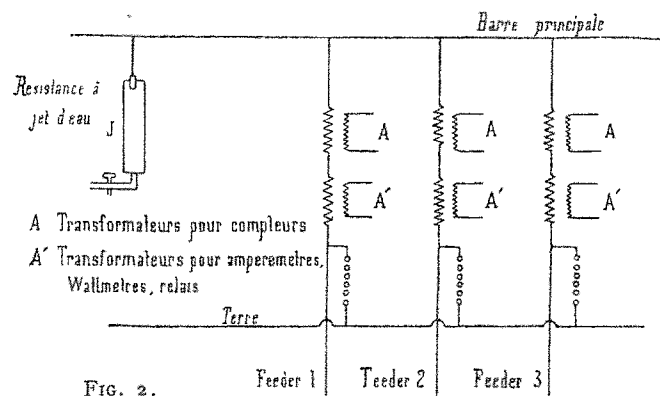


FIG. 2.

Tous ces exemples établissent qu'un court-circuit ou mise à la terre d'une phase sur un câble détermine des surtensions sur tout le réseau, que révèle notamment le fonctionnement de limiteurs de tension autres que ceux placés sur ce câble, et même le fonctionnement des limiteurs de sous-stations éloignées, sans aucune liaison avec le câble avarié, mais branchées sur les mêmes barres communes de l'usine génératrice. Les surtensions arrivent à ces barres franchissant les différents transformateurs de mesure que réducteurs d'intensité pour les compteurs, ampèremètres, relais et wattmètres, malgré la self-induction considérable de ces transformateurs (fig. 2).

Ce phénomène est nettement confirmé dans le deuxième exemple où le limiteur liquide à jet d'eau J, placé sur la barre principale a été vidé sous l'effet d'une surtension.

*Résistances liquides.* — Un phénomène général attire médiatement l'attention lorsqu'on examine les divers exemples qui viennent d'être rappelés : c'est la régularité et la rapidité avec laquelle les résistances liquides, en série avec les limiteurs de tension, sont mises hors de service.

Ce phénomène a été étudié avec grand soin, et a fait l'objet de recherches et d'expériences dont voici les principaux résultats.

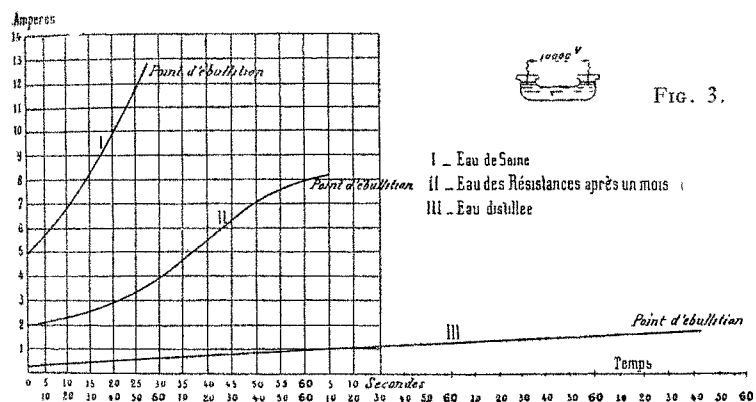
Lorsqu'un limiteur de tension commence à fonctionner, le débit qui traverse la résistance liquide ne tarde pas

l'échauffer, ce qui a pour effet de diminuer la valeur ohmique de la résistance. Si la surtension ne dure qu'un temps très court, les rouleaux du limiteur peuvent être avariés plus ou moins gravement, mais la résistance liquide reste intacte.

Si, au contraire, la surtension persiste plus longtemps, si par exemple, lorsqu'elle est due à la mise à la terre d'une phase, le câble avarié n'est pas isolé très rapidement, l'intensité du courant augmente progressivement avec l'élévation de température ; l'eau ne tarde pas à entrer en ébullition, et finit par être projetée violemment sur le sol.

Les essais ont eu pour but de déterminer la valeur de l'accroissement d'intensité du débit avec la température, et le temps nécessaire pour produire l'ébullition. A cet effet, une résistance liquide en U, du genre de celle indiquée sur la figure 3, fut montée entre phases sur un alternateur de 350 kw., 10 000 volts.

Avec de l'eau distillée à la température de 9°, l'intensité du débit fut au début de 0,4 ampère ; cette intensité augmenta lentement, et ce n'est qu'au bout de 4 minutes 55 secondes que se produisit l'ébullition avec un débit de 2 ampères environ. Le courant fut alors coupé.



On eut l'idée de rechercher, s'il ne se produisait pas, avec le temps, une modification dans les caractéristiques de la résistance, et l'on recommença l'expérience avec de l'eau, prise dans des résistances en service, où elle avait séjourné environ 4 mois. Les résultats qui ont été figurés sur la courbe II sont si nettement différents, qu'il a fallu, dans la figure 3, doubler l'échelle des temps. La température initiale était, comme pour l'eau distillée, de 9°. L'intensité du courant a été dès le début de 2 ampères, c'est-à-dire celle qui n'avait été atteinte avec l'eau distillée qu'au bout de 5 minutes, au voisinage du point d'ébullition ; elle augmenta très rapidement, et atteignit 8 ampères après 62 secondes, moment où l'ébullition commença et où le courant fut coupé.

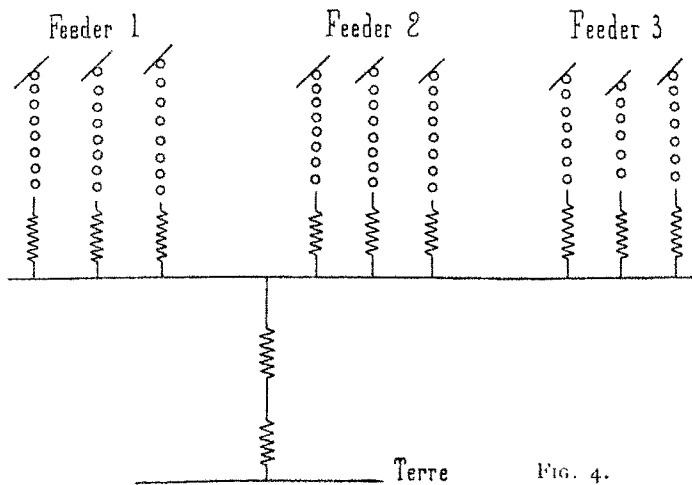
La courbe I a trait à un essai fait avec l'eau de Seine, et elle accuse encore mieux l'effet des impuretés de l'eau. Avec une même température initiale, l'intensité fut de 5 ampères au début, et l'ébullition commença au bout de 27 secondes seulement avec un débit de 12 ampères.

Il y a bien évidemment le plus grand intérêt à porter le résultat de ces essais à la connaissance des exploitants, et les services qu'ils peuvent rendre sont tels qu'on ne saurait être trop reconnaissant envers ceux qui les ont si libéralement fait connaître.

Premières mesures de précaution. — On a recherché si, en modifiant la disposition du tableau, on pourrait éviter la propagation des effets de surtension.

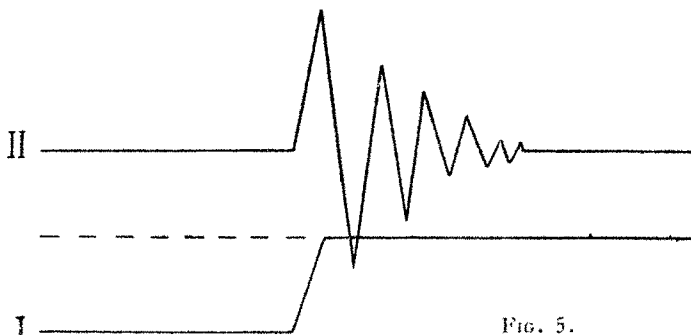
La figure 4 indique une modification au schéma de la figure 2. La barre à laquelle sont reliées les résistances en série avec les limiteurs de tension des divers feeders, au lieu

de constituer une terre franche, a été isolée et reliée à la terre par deux résistances liquides en série. On a aussi essayé d'ajouter à ces résistances un nouveau limiteur de tension. Ce montage a été effectué sur un tableau à 10 250 et, depuis un an, quoiqu'il se soit produit sur le réseau des phénomènes de surtension, dus à la mise brusque à la terre d'une phase ou à un court-circuit entre phases, le réseau et les machines n'ont pas eu à en souffrir.



D'ailleurs, en ce qui concerne les machines, une expérience déjà longue semble prouver qu'elles sont bien protégées contre les surtensions par les limiteurs à jet d'eau. En tout cas, ces limiteurs, s'ils ont l'inconvénient d'entraîner une perte constante (environ 30 kw.), ont l'avantage de présenter une résistance faible au passage des décharges et cela à chaque instant, sans avoir recours à un éclateur toujours susceptible de donner des résonances et dont la fusion des rouleaux est très difficile à éviter.

Malheureusement, ces dispositifs perfectionnés ne donnent pas encore une sécurité aussi grande qu'il serait à désirer et on se l'explique aisément. En effet, la mise à la terre d'un conducteur crée une surtension d'autant plus grande que cette mise à la terre aura été plus instantanée. La tension se trouvant brusquement annulée sur le conducteur I (fig. 5), il se produit sur le conducteur II une surtension d'amplitude et de fréquence décroissante, suivant une loi oscillatoire.



Cette surtension produit des courants de charge et de décharge de très grande fréquence et de forme oscillatoire, courants qui peuvent entrer en résonance pour une valeur appropriée de la self et de la capacité. Ces courants seront donc renforcés à certains instants et leur amplitude maximum formera une nouvelle fonction oscillante. L'ensemble de ces phénomènes occasionne dans le réseau une perturbation dangereuse. Les points les plus faibles sauteront et pourront créer de nouvelles surtensions. Si leur action vient s'ajouter à la cause initiale, les appareils de sécurité, dont on dispose, peuvent devenir insuffisants.



Un exemple fera mieux comprendre la complexité et la superposition des effets.

*Sixième exemple.* — En raison de la multiplicité des phénomènes, l'exposé chronologique des diverses constatations paraîtrait d'autant plus obscure que la cause initiale n'a été découverte que tardivement, lorsque le câble avarié a été automatiquement coupé. L'exposé ci-après donne la suite des phénomènes telle qu'elle a pu être reconstituée.

Le réseau était un réseau diphasé, comportant en réalité quatre phases ; la tension entre phases diamétralement opposées bleue et blanche, ou rouge et noire, était de 12 500 volts. Une partie du réseau était alimentée à 6 000 volts par deux transformateurs statiques de 900 kw., branchés sur les barres principales à 12 500 volts. La puissance totale des machines en service, au moment de l'accident était de 12 000 kw. ; mais la charge totale était seulement de 6 000 kw.

Au cours d'un travail en galerie, un coup de pioche avait blessé un certain câble A. La fermeture de l'interrupteur de ce câble avarié détermina une surtension sur le réseau par la mise à la terre de la phase *blanche*.

Le premier effet de la surtension fut de déterminer dans une sous-station S un arc entre la terre et le limiteur de la phase *bleue*. L'interrupteur du circuit bleu-blanc à la sous-station S, qui était à *déclenchement instantané*, coupa brusquement. Cet interrupteur, calculé pour une puissance normale de 1 000 kw., ne put supporter l'énorme débit du court-circuit alimenté par des génératrices de 12 000 kw., débit d'autant plus intense que l'interrupteur, n'étant pas à temps, a dû couper sous la pleine tension. Le bac en fonte de cet interrupteur éclata et, par suite du court-circuit entre phases et terre, une nouvelle surtension se produisit, dont le premier effet fut de faire déclencher à la centrale l'interrupteur du câble B, reliant la sous-station à l'usine.

Cette surtension, en outre, amorça un violent court-circuit sur le réseau à 6 000 v., qui fit ronfler les alternateurs et déclencher automatiquement. Au démontage, on constata (fig. 6) qu'un arc avait sauté à l'intérieur du transformateur entre la borne d'entrée de la phase *bleue* et le serpentin de refroidissement dans l'huile ; la distance entre ces deux points est d'environ 12 cm.

Les enroulements des transformateurs étaient en bon état et, après remplacement d'une porcelaine avariée, ils purent être remis en service. Il est à remarquer que le limiteur de tension à rouleaux avec résistance liquide en série, placé aux bornes mêmes du transformateur, ne présentait aucune trace de brûlure.

A partir de ce moment, on constata que les limiteurs de la phase *bleue* des divers feeders fonctionnaient d'une façon presque continue, par suite de la surtension créée par la mise à la terre de la phase *blanche* du câble A, qui était resté enclenché, la mise à la terre n'étant pas assez franche pour déterminer un court-circuit. Le fonctionnement des limiteurs phase *bleue* était particulièrement violent sur les câbles C et D. Le câble D dut même être coupé par crainte de fusion des rouleaux du limiteur, phase *bleue*, de ce câble.

Environ 10 minutes après, on enclencha un nouveau

câble E. Presque aussitôt, il déclencha automatiquement sur un court-circuit violent, qui fit ronfler fortement les machines. A la sous-station S', desservie par ce câble E, le limiteur de tension de la phase bleue fut fondu. Les enregistreurs indiquèrent que le court-circuit avait atteint 15 000 kw. Quoique les limiteurs continuassent à cracher d'une façon presque permanente sur la phase *bleue*, on réenclencha le câble C et l'on mit une nouvelle machine en parallèle sur les barres principales.

Enfin, cinquante minutes après le début de ces incidents multiples, le défaut du câble A s'accrut et intéressa les 4 phases. Un court-circuit violent se produisit entre phases et la terre, amenant une surtension qui détériora le limiteur phase *noire* de ce câble, dont les rouleaux furent en partie fondus et soudés les uns aux autres. L'eau de la résistance liquide était brûlante, et légèrement répandue sur le sol, mais les électrodes étaient toujours en contact. Sur le limiteur de la phase *bleue*, un arc avait sauté du couteau de mise à la terre aux cloisons en ciment armé ; la résistance liquide était intacte.

Sous l'action de ce court-circuit, l'interrupteur du câble A, cause première de tous les incidents, déclencha ; les limiteurs des autres câbles rentrèrent au repos et le service fut repris normalement.

Dans cet exemple, la surtension due à la mise d'une phase à la terre d'un câble A, détermina donc :

- 1° Un court-circuit dans une sous-station par suite du déclenchement d'un interrupteur à action instantanée ;
- 2° Un arc à la terre à une borne haute tension d'un transformateur statique ;
- 3° Le déclenchement automatique de l'interrupteur d'un câble E, sur lequel on constata un court-circuit de 15 000 kw.

Chacun de ces courts-circuits est venu renforcer l'effet de la surtension primitive, et il fallut près d'une heure pour que le défaut du câble, primitivement avarié, s'accrut au point de faire déclencher son propre interrupteur.

Comment éviter le retour de pareils incidents ? Telle est la question qui se pose. On en connaît les effets, la cause première, on peut même dire la marche ; plus il sera envoyé de renseignements, plus les lois de cette propagation des effets d'une surtension ou d'un court-circuit seront mieux connues, et, s'il est vrai qu'un problème bien posé est résolu, un des membres si expérimentés, si autorisés de notre Association ne manquera pas de trouver le remède et de rendre ainsi un service signalé à l'industrie électrique.

Mais la première condition est que tous vous apportiez votre collaboration au Comité, en lui envoyant des renseignements aussi nombreux et aussi précis que possible. L'exposé qui vient d'être fait sur une question toute spéciale a eu pour but de vous montrer quels pouvaient être les avantages d'une large et sincère collaboration.

Elle sera encore bien plus utile dans l'étude des courts-circuits dans les machines, où les renseignements déjà parvenus révèlent des effets électriques et électrodynamiques du plus haut intérêt. Mais pour que la Commission puisse dégager les lois de ces phénomènes et poser des problèmes techniques précis aux savants et aux constructeurs, il faut que tous les constructeurs et les exploitants lui apportent le concours de leur expérience et confessent leurs déboires.

Nous avons reproduit ce rapport pour inviter les lecteurs de *La Houille Blanche*, à fournir au Comité de la « Société des Electriciens », la collaboration à laquelle fait si judicieusement appel M. LECOÛËZ.

