

État actuel de l'Appareillage électrique d'interruption pour hautes tensions alternatives.

Par G. GERIN, des *Etablissements Merlin et Gerin*, à Grenoble.

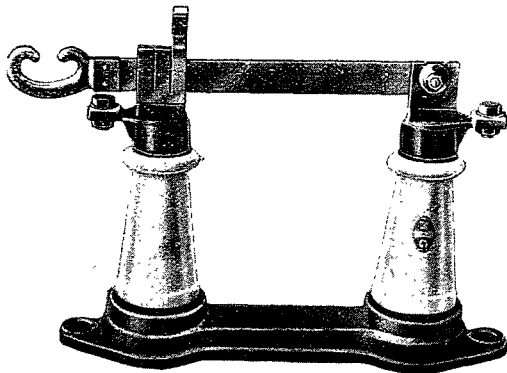
HISTORIQUE

Au cours des premiers temps du développement des applications électriques on se contentait de transporter seulement sur de courtes distances une faible quantité d'énergie.

Cette dernière suffisait alors pour les besoins du moment. Mais par suite de la rapide croissance du développement des applications de l'électricité, les réseaux de distribution ont pris des proportions énormes. On transporte aujourd'hui à plusieurs centaines de kilomètres des puissances pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de K.V.A.

Tant qu'on opérait sur de faibles puissances, la mise en circuit et hors circuit des lignes ou appareils d'utilisation se faisait de la manière la plus simple et personne ne se doutait que ceci était le sujet d'un problème destiné à devenir si important plus tard et qui n'est pas encore complètement résolu.

Ce premier type d'interrupteur est celui appelé communément aujourd'hui « sectionneur ». A l'origine, il différait très peu de l'interrupteur à couteau B. T. et c'est d'ailleurs de la forme de ce dernier que les constructeurs s'inspirèrent.



Sectionneur unipolaire sur isolateurs lisses 15.000 volts
250 ampères.

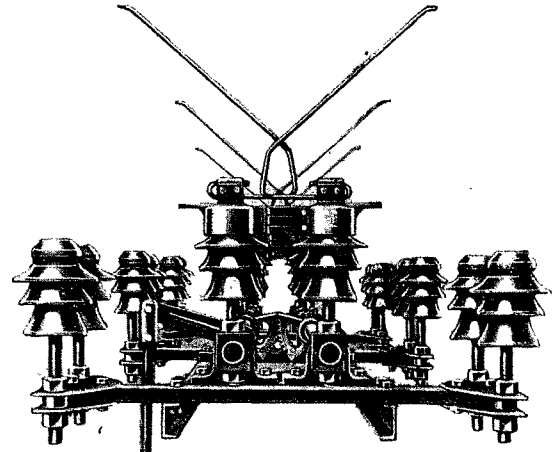
Ceci revient à dire qu'on ne faisait pas de différence entre l'appareil de manœuvre pour basse tension et haute tension, mais avec des puissances croissantes, quoique encore bien inférieures à celles rencontrées de nos jours, on s'aperçut que le sectionneur était un appareil peu sûr pour couper en charge, parce que chaque interruption faite dans ces conditions donnait lieu à un arc, qui prenait dans l'air un développement considérable, détériorant l'appareil et donnant lieu parfois à des accidents de personne.

L'attention des constructeurs fut alors appelée sur cet arc. Comme on ne possédait pas encore de moyens très efficaces pour parer à ses effets, on se contenta de chercher à le souffler.

On fit alors des appareils à soufflage magnétique encore en faveur pour les distributions à courant continu, mais qui furent ensuite rapidement abandonnés pour céder la place à l'interrupteur à cornes dans lequel le soufflage est obtenu d'une manière en quelque sorte automatique, en utilisant la vitesse du courant d'air ascendant provoqué par l'échauffement de l'air ambiant, et sans l'intervention de bobines destinées à créer un champ magnétique.

Ce dispositif fut inspiré par le parafoudre à cornes, alors déjà

connu, et subsiste encore de nos jours pour les faibles puissances, sous la désignation « d'interrupteur aérien ».



Interrupteur aérien 30.000 volts.

Lorsque l'énergie transportée augmenta encore, on éleva avec elle la tension de distribution. Il fut impossible de continuer à admettre un appareil de manœuvre donnant lieu à un arc dans l'air, car celui-ci prenait alors un développement par trop considérable. On eut l'idée d'effectuer la rupture dans l'huile de pétrole déjà utilisée pour l'isolement des transformateurs.

Ce fut là un progrès décisif dans la construction de l'appareillage d'interruption.

C'est depuis ce temps qu'il devint possible de rompre des puissances notables à des tensions croissant de jour en jour.

Aujourd'hui, l'exploitant a à sa disposition des appareils dont la capacité d'interruption certaine dépasse la limite des plus fortes puissances transportées.

EFFORTS RÉALISÉS

Ce n'est pas tout de suite cependant que l'on parvint à construire des appareils aussi sûrs.

Les constructeurs tâonnèrent longtemps et ce fut le règne d'un empirisme présidant seul à la détermination des appareils.

La construction actuelle est le fruit d'une longue pratique dont toutes les expériences ont été disséquées à la lumière des données scientifiques et aussi parfois de longues et patientes recherches.

En particulier, ce n'est que lentement qu'on s'expliqua les phénomènes de rupture à travers l'huile.

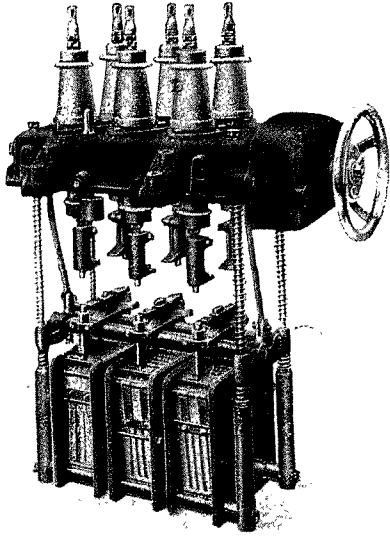
On crut tout d'abord que la rupture était effectuée au sein du liquide. Ce fut seulement le jour où l'on eut pénétré le processus physique du phénomène de l'arc électrique, que l'on s'aperçut que ceci était incompatible avec les conditions même d'existence de ce phénomène.

On conçut alors l'hypothèse d'une vaporisation spontanée d'une certaine quantité d'huile formant dans son sein une masse gazeuse à l'intérieur de laquelle l'arc peut se développer librement.

On chercha ensuite quel était l'effet sur l'arc de rupture des constantes actuelles du réseau ? On différencia la coupure en charge inductive de celle en charge ohmique ; on se préoccupa

aussi des surtensions d'extra-courant de rupture, et on étudia l'influence soit d'une résistance, soit d'une réactance insérée en série dans les circuits au moment de la rupture.

De cette dernière étude subsiste aujourd'hui l'appareil à résistance de choc.



Disjoncteur dans l'huile 10.000 volts, 250 amp. muni de résistance de choc.

On sentit le besoin d'effectuer des expériences sérieuses de manière à contrôler rigoureusement l'exactitude des hypothèses émises, de délimiter leur champ d'application, et enfin, d'en déduire des règles précises permettant la prédétermination exacte d'un appareil opérant avec toute la sécurité désirable.

Nous ne passerons pas en revue les diverses tentatives et ne décrirons pas tout au long les expériences effectuées : nous nous bornerons à citer les mémoires de Meriam (*Transactions of the A. I. E. E.* Vol. XXX), de Ryndall et de Collis (*Transactions of the A. I. E. E.* Vol. XXXIV), en Amérique, et celui de Bruno Bauer (*Bulletin de l'A. S. E.* 1917, fascicules 9 et 10), en Suisse.

A l'heure actuelle, le mécanisme de la rupture dans l'huile est expliqué comme suit :

Au moment de la séparation des contacts, la résistance de contact devient telle que l'anode est vaporisée, la cathode est échauffée, et que par conséquent, la mince pellicule d'huile qui s'introduit entre les électrodes est également vaporisée ; à ce moment l'arc s'établit. Au fur et à mesure que les contacts sont éloignés, il se développe dans une enceinte libre d'huile dont le volume augmente d'ailleurs par suite de la haute température de l'arc et croît ainsi jusqu'à l'extinction.

L'arc passe donc par toutes les phases successives. Il agit sur le circuit comme une résistance variable, pour une certaine valeur de cette résistance, l'arc est stable, puis il devient de plus en plus instable et s'éteint définitivement.

Nous ne savons pas quelle est la loi de variation de la résistance introduite en série dans le circuit par l'arc, mais nous savons qu'elle se différencie de celle d'un arc stationnaire en ce sens qu'elle est fonction de la distance des électrodes. Le même phénomène a lieu d'ailleurs avec les appareils à cornes.

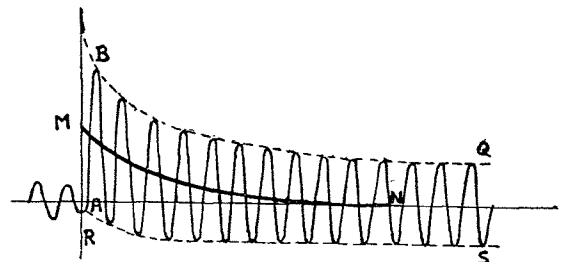
Nous ne savons pas non plus tenir compte de l'ionisation due à l'arc et aux électrodes incandescentes. Néanmoins, il y a tout lieu de croire que celle-ci n'a pas grande influence sur le développement de l'arc alternatif à basse fréquence. En effet, la durée de la période d'extinction au passage du courant par zéro, est suffisante pour que la recombinaison des ions, antérieurement formés soit

pratiquement complète, et que ceux-ci n'aient pas d'influence sur la nouvelle période de rallumage de l'arc.

En outre, tous les expérimentateurs sont d'accord pour admettre que la coupure dans l'huile, par suite de la formation d'une masse gazeuse et de la pression qui résulte de sa température, donne lieu, au moment de la détente du gaz, à un travail mécanique appelé « Travail de rupture ». Le travail de rupture met en jeu une certaine quantité d'énergie dite énergie de rupture, empruntée à l'énergie électrique du système interrompu. C'est le mémoire de Bruno Bauer qui donne le plus de précision à ce sujet. Il permet de calculer le travail de rupture et de dimensionner l'appareil en conséquence.

On définit ainsi la capacité de rupture d'un interrupteur, c'est-à-dire la plus grande puissance interruptible en toute sécurité ; c'est le produit du plus fort courant de court-circuit compatible avec les conditions de l'installation par la tension normale de service supposée maintenue. Cette dernière supposition est évidemment fautive et fournit des résultats erronés par excès. Ceci explique que la capacité de rupture ait le caractère d'une valeur limite. Toutefois, il est nécessaire de se mettre en garde contre la supposition actuelle qu'en court-circuit la tension tombe à zéro. Il ne faut pas oublier que les générateurs modernes peuvent avoir une réactance interne atteignant 15 à 35 %.

Enfin, on n'est pas assez sévère en général dans l'évaluation du rapport du courant de court-circuit permanent au courant normal de l'alternateur.



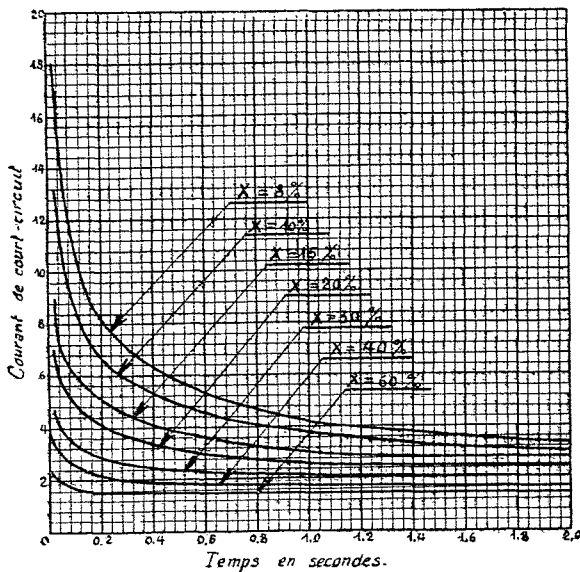
Courant de court-circuit.

On suppose ordinairement que ce rapport est égal à 3, mais nous rappelons à ce sujet qu'il existe d'excellentes études de la question, l'une des plus suggestives se trouve dans un mémoire de O. R. Doherty et O. E. Shirley (*Transactions of the A. I. E. E.* Vol. XXXVII) qui donnent sous forme de tableau les résultats d'essais de courts-circuits effectués sur une trentaine de machines de caractéristiques diverses du type à pôles saillants et pour lesquelles ils trouvent des valeurs du rapport précédent variant entre 3,5 et 4,5 mais atteignant parfois 6.

Il y a lieu de remarquer, en outre, que le courant de court-circuit transitoire ou courant d'établissement du court-circuit peut atteindre des valeurs beaucoup plus considérables (jusqu'à 20 ou 30 fois le courant normal) (Diamant : Sudden short-circuit Phenomena and transient armature reactance of alternators. *Transactions of the A. I. E. E.*, vol. XXXVII) ; mais, il est inutile de s'en inquiéter au moment de la rupture, car la durée de la période d'établissement du courant de court-circuit est telle que l'inertie des pièces mécaniques produisant cette rupture permet de la dépasser largement.

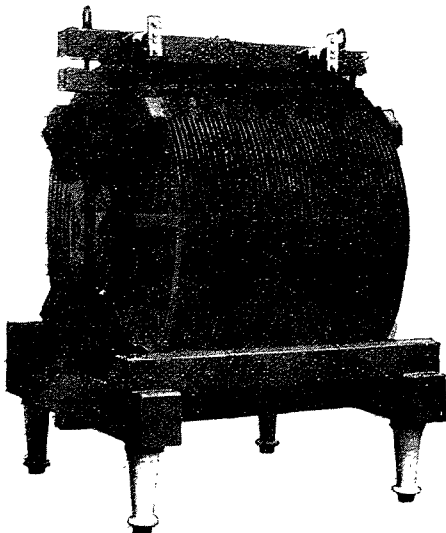
Le plus important progrès de ces dernières années consiste précisément à savoir déterminer le type d'interrupteur convenable pour une installation, ou des conditions, données. En effet, en aucun cas, on ne doit admettre d'appareil dont la capacité de rupture soit inférieure à la puissance maximum interruptible. Il appartient à l'exploitant de limiter par des dispositifs particuliers la valeur des courants des courts-circuits maxima pour ne pas imposer aux appareils de son réseau des dimensions

incompatibles avec une distribution économique. Les appareils couramment employés à cet effet sont les bobines de réactance. Disons, en passant, que c'est là un puissant moyen de réduction du courant de court-circuit à la fois en régime transitoire et permanent, et dont l'emploi judicieux permet de prévenir les accidents dus au premier régime de ce courant.



Courbes pour les déterminations de courant de court-circuit en fonction du temps, et de la réactance sur le réseau.

En outre, l'emploi de relais temporisés permet l'établissement du courant permanent de court-circuit et par conséquent la diminution de la puissance interruptible au moment de la coupure. Enfin, c'est grâce au relais sélectionné et temporisé qu'il peut être paré aux inconvénients de l'interruption de service en séparant les points endommagés de la distribution générale.



Bobine de réactance.

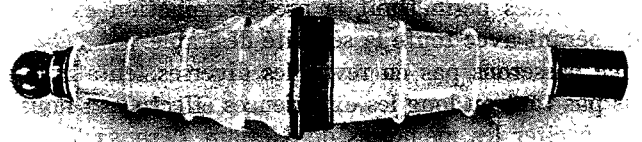
Pour nous résumer, nous dirons donc qu'à l'heure actuelle, grâce à la pratique acquise à des études minutieuses de conditions du problème et à quelques expériences particulièrement bien conduites, la construction de l'appareillage d'interruption est sortie de la période de tâtonnements et d'empirisme dans laquelle elle était plongée jusqu'à ces derniers temps.

L'exploitant sait déterminer la puissance maximum interruptible de son réseau, donnée essentielle pour le constructeur qui dimensionne l'appareil suivant des règles facilement applica-

bles et contrôlables. Le constructeur étudie, d'après les lois physiques connues, les difficultés rencontrées.

En particulier, au cours du développement des tensions de distribution, l'étude des bornes d'amenée et de sortie du courant dans l'interrupteur devint nécessaire. On s'aperçut que les propriétés diélectriques de l'air ne permettaient pas de se contenter de porcelaines d'entrée et de sortie de dimensions plus ou moins grandes à l'intérieur desquelles le conducteur était engagé axialement et entouré d'une couche d'air d'épaisseur variable. L'air, dans ces conditions, est ionisé par le champ et la traversée ainsi constituée se perce. Pour éviter cet inconvénient, il faut diminuer le champ électrique au voisinage du conducteur. Ceci conduit à des dimensions de traversées prohibitives, de sorte qu'à partir des tensions de l'ordre de 45.000 volts, on ne construit plus de bornes contenant de l'air.

A l'heure actuelle, plusieurs dispositions sont connues, et donnent de bons résultats. Dans un premier dispositif, on remplit l'espace annulaire entre le conducteur et la porcelaine soit avec un mélange, huile-résine, soit avec un mélange, fluide à chaud, solide à froid, vaseline-résine. Ce dispositif a pour inconvénient d'augmenter le champ dans l'air à la surface extérieure de la traversée, ce qui donne lieu à l'apparition prématurée d'effluves, au moins pour les bornes à très haute tension. Suivant un deuxième dispositif, on constitue la borne par une série de condensateurs en cascade, ce qui a l'avantage d'uniformiser le champ radial tout en donnant une meilleure répartition du champ longitudinal. Les deux dispositions sont employées concurremment pour les très hautes tensions.



Traversée sur 70.000 volts.

Enfin, on a étudié le champ électrique en lui-même, nous nous bornerons à citer les mémoires de Forstescue (Application of an electrostatic Theorem to a Insulation Problem) (*Transactions of the A. I. E. E.*, Vol. XXXII) de Ch. Rice (*Experimental Solution of a Electrostatic Problem*) (*Transactions of the A. I. E. E.*, Vol. XXXVI), et de Kuhlmann (*Bulletin de l'A. S. E.* 1916). On a donné aux surfaces des formes convenables pour réduire les variations trop rapides du champ électrique, ceci afin d'empêcher l'apparition des effluves prématurées, de sorte qu'aujourd'hui la fabrication des bornes est un véritable problème d'électrostatique dont la solution s'obtient par des procédés connus en appliquant les admirables travaux de Maxwell et de ses continuateurs.

ETAT ACTUEL

Nous avons décrit les progrès réalisés en matière de construction d'appareillage électrique. Voyons quel est son état actuel.

Contrairement à la machine tournante, l'interrupteur n'a pas atteint son état limite. En effet, la machine tournante est douée d'un rendement qu'on ne peut espérer dépasser. On a simplifié et standardisé sa construction et rien ne permet de prévoir que celle-ci subira un changement radical; bien plus, rien ne permet de prévoir pourquoi un tel changement serait souhaitable. La machine

tournante est basée sur les lois de l'induction connues et appliquées depuis longtemps avec une maîtrise absolue. Elle met en jeu les propriétés magnétiques des matériaux industriels, et on a tiré de ceux-ci tout ce qu'ils pouvaient raisonnablement donner. Nous pouvons donc dire que la construction de la machine tournante, (et aussi du transformateur), semble à l'heure actuelle définitive et immuable, au moins dans ses grandes lignes.

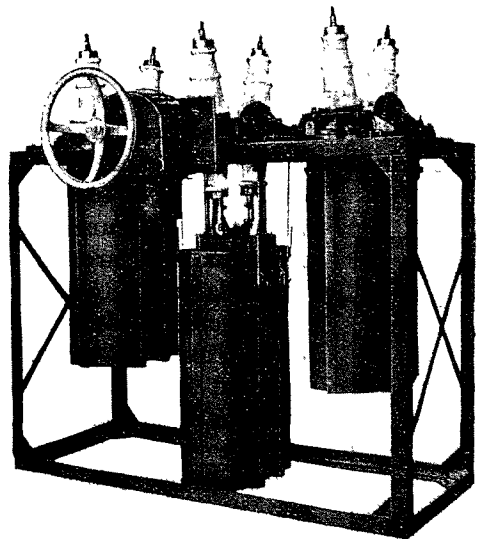
En est-il de même de l'interrupteur ?

Nous ne le pensons pas, car si on connaît en *gros* les manifestations de l'arc de rupture, son mécanisme intime nous est inconnu et c'est là pourtant que réside tout le problème de la rupture.

À l'heure actuelle, deux conceptions se sont fait jour en matière d'appareillage d'interruption.

La première, que nous appellerons « germano-suisse » agit sur l'arc en plaçant celui-ci dans un grand volume d'huile et en fractionnant la rupture. C'est-à-dire en introduisant le plus grand nombre possible d'arcs en série.

L'idée fondamentale de cette manière de procéder est celle-ci. Si on dispose plusieurs arcs en série, en plaçant convenablement les contacts on effectue plusieurs parcours simultanément, la durée du parcours total des contacts mobiles se réduit donc à la durée d'un parcours élémentaire. En définitive, la vitesse de rupture est augmentée et le temps de rupture diminué.



Disjoncteur dans l'huile tripolaire 40.000 volts, 250 amp.

Malheureusement, ce raisonnement tombe de lui-même si on remarque que :

a) Quand on remplace un arc unique de longueur l par n arcs égaux en série, la longueur λ de chacun de ces arcs est plus grande que $\frac{l}{n}$, l'expérience montre même que λ est d'autant plus grand que $\frac{l}{n}$, que n est plus grand ;

b) La vitesse de rupture dont on parle généralement est la vitesse moyenne. Elle est fonction de la durée du mouvement. En particulier, si les contacts mobiles sont sollicités seulement par la pesanteur, diminuer l'espace à parcourir x revient aussi entre certaines limites à diminuer la vitesse, car celle-ci est égale à $\frac{1}{2} \sqrt{2gx}$.

En définitive, cette solution apparaît comme plutôt illusoire. Elle a en outre l'inconvénient de rendre les appareils encombrants, de conduire à des équipages mobiles plutôt lourds et dont la manœuvre exige parfois des efforts considérables.

La seconde conception est celle des Anglo-Saxons et principalement des Américains.

Elle consiste à se contenter de deux ruptures en série, (il est plus facile d'en réaliser deux qu'une seule au point de vue constructif), mais à prendre toutes les précautions nécessaires pour rendre ces ruptures « effectives » et rapides.

Ceci les a conduit, par exemple, à entourer l'arc d'un cylindre convenablement isolé, dit chambre d'extinction, et dont le rôle consiste à créer une surpression au voisinage de l'arc. Suivant la loi de Paschen, le potentiel explosif, qui intervient seul à chaque réallumage de l'arc, après le passage du courant par zéro est d'autant plus grand que la pression est plus élevée. Le produit $P.l$ de la pression par la distance explosive des électrodes reste au contraire constant. De sorte que si la pression augmente, la longueur d'arc diminue et la rupture ainsi est plus rapide.

Les appareils ainsi construits conservent tous les avantages d'une extrême simplicité qui peut être jointe à une grande robustesse.

Cependant, malgré les divergences de vues sur certains moyens employés pour augmenter la sécurité du fonctionnement des interrupteurs, il est un certain nombre de points sur lesquels tous les constructeurs, qu'ils procèdent soit de la conception germano-suisse, soit de la conception américaine, sont d'accord. Le plus important est celui de la nécessité d'augmenter les vitesses de rupture. En effet, plus cette vitesse est grande, plus le temps nécessaire à effectuer la rupture est court, et par conséquent, plus le travail de rupture est diminué. Il résulte de ce qui précède une tendance générale à augmenter la course des contacts mobiles, ce qui présente un double avantage. Celui d'obtenir une plus grande vitesse de séparation de contacts et celui d'avoir dans tous les cas des courses supérieures à la plus grande longueur d'arc possible.

CONCLUSION

Ceci suffit pour se rendre compte que le dernier mot n'est pas dit en matière d'appareillage d'interruption, Il reste au contraire beaucoup à faire. Il serait extrêmement désirable que des essais systématiques puissent être effectués dans les conditions réelles d'utilisation des appareils. Malheureusement, si le constructeur peut se livrer à toutes sortes d'épreuves électro statiques permettant de vérifier l'isolement, il lui est impossible d'entreprendre les précédentes ou épreuves électro-dynamiques, seules capables de donner une garantie de bon fonctionnement. Le constructeur n'a pas à sa disposition la puissance nécessaire pour faire des essais de rupture en charge. Il serait cependant du plus haut intérêt à la fois du constructeur et de l'exploitant que ces essais puissent être effectués. Il nous semble alors qu'il appartiendrait à un groupement puissant et suffisamment riche, tel que par exemple l'Union des Syndicats d'Electricité, de créer un laboratoire où des études systématiques pourraient être entreprises et dont les exploitants seraient les premiers à profiter.

Nous conclurons en attirant l'attention sur la nécessité d'établir également une réglementation précise en matière de construction et d'essais de réception de l'appareillage d'interruption pour haute tension. On pourrait reprendre, après études et expériences nouvelles la réglementation du V. D. E. (Verband Deutscher Elektrotechniker) en précisant davantage les conditions de fonctionnement ou « dynamiques » d'emploi des appareils, les règles du V. D. E. concernant en quelque sorte presque exclusivement les conditions d'isolement ou « statiques ». Il est de l'intérêt de l'exploitant que ne puissent être mis sur le marché des appareils construits en dépit des règles les plus élémentaires de la prudence, si on songe que souvent du bon fonctionnement d'un interrupteur dépend l'avenir de toute l'installation.