

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 20 (1929)
Heft: 21

Artikel: Enquête sur les interrupteurs dans l'huile
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060782>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.02.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XX. Jahrgang
XX^e Année

Bulletin No. 21

November I 1929
Novembre I 1929

Enquête sur les interrupteurs dans l'huile.

Rapport du Comité Suisse chargé d'en présenter les résultats
à la Conférence internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension.

621.317.35

Le présent rapport donne et commente les résultats d'une enquête internationale sur quelques questions importantes concernant les interrupteurs dans l'huile, préparées le 1^{er} juillet 1927 à Paris, à l'occasion de la IV^e session de la Conférence internationale des Grands Réseaux. Il a été présenté à la session 1929 de cette conférence par le comité suisse qui avait été chargé de l'enquête.

Il rappelle sommairement quelques notions théoriques se rapportant au sujet traité, donne un aperçu comparatif des prescriptions en vigueur sur la matière dans différents pays, tire les conclusions des réponses reçues, et présente un certain nombre de suggestions pour l'élaboration de règles d'unification concernant la définition des caractéristiques principales des interrupteurs dans l'huile. Ce rapport contient aussi des résultats d'expériences faites par de nombreux exploitants.

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse einer internationalen Enquete über einige wichtige Fragen betreffend die Oelschalter; diese Fragen wurden anlässlich der IV. Tagung der «Conférence internationale des Grands Réseaux» am 1. Juli 1927 in Paris vorbereitet, worauf die Durchführung der Umfrage einem schweizerischen Komitee überlassen wurde, welches bei der diesjährigen Konferenz den nachstehenden Rapport vorbrachte.

Der Bericht stellt zunächst einige theoretische Begriffe fest, die sich auf das Gebiet der Oelschalter beziehen, gibt einen vergleichenden Ueberblick der diesbezüglichen Vorschriften der verschiedenen Länder, zieht bestimmte Schlüsse aus den erhaltenen Antworten und macht eine Anzahl Anregungen in bezug auf die Aufstellung einheitlicher Regeln für die Definition der charakteristischen Grössen der Oelschalter. Er enthält ferner Erfahrungsergebnisse zahlreicher Betriebsleiter.

Préambule.

Les interrupteurs constituent un élément d'importance capitale dans une installation à haute tension; la sécurité du service de l'installation dépend en grande partie de leur bon fonctionnement. Autrefois, on se contentait d'indiquer au moment de la commande d'un interrupteur, la tension et le courant de service. Depuis quelque temps, il a été reconnu que ces indications sont tout à fait insuffisantes et que les exploitants doivent, lors du choix d'un interrupteur, préciser les valeurs maxima de l'intensité de rupture, de la tension de service, ou encore de la tension de rupture, et dans certains pays (Allemagne, Angleterre, Suisse) de la puissance de rupture auxquelles l'appareil peut être exposé. En outre, il y a lieu d'indiquer l'amplitude maximum du courant initial de court-circuit, cette amplitude déterminant les contraintes d'origine électro-dynamique exercées sur les différentes parties de l'interrupteur lorsque l'enclenchement se produit sur un court-circuit.

Les définitions de ces notions ont été formulées dans plusieurs pays¹⁾ sous forme de règles ou directives. Les commissions qui ont eu à élaborer ces règles dans les différents pays ne sont parties, ni du même point de vue, ni des mêmes bases techniques. De ce fait, les définitions données aux termes employés n'ont pas partout le même sens, ce dont il est facile de s'assurer en consultant le tableau comparatif No. 1.

Le besoin d'une étude approfondie de la question complexe des interrupteurs à huile se faisant donc de plus en plus sentir, un grand nombre de participants à la session de 1927 de la Conférence internationale de Grands Réseaux ont exprimé le désir qu'une enquête fût faite sur ce sujet et que son résultat fût présenté lors de la session de 1929.

Un Comité Suisse fut chargé de procéder à l'enquête, d'en tirer des conclusions et, si possible, de présenter des suggestions relatives à la définition des grandeurs caractéristiques à envisager pour le choix des interrupteurs à huile des installations à haute tension. Ce Comité, composé de MM. Perrochet, président, Bourquin, secrétaire, Dutoit, Hug, Dr. Kopeliovitch, Puppikofer, Rutgers et Dr. Sulzberger, établit un questionnaire basé sur un avant-projet élaboré à Paris en 1929. Afin d'éviter des réponses vagues pouvant induire en erreur, les questions furent complétées d'explications données dans des annexes correspondantes et destinées à faciliter les réponses à faire, ainsi que d'une courte étude empruntée en grande partie aux „Directives Suisses pour le choix des interrupteurs des installations à courant alternatif à haute tension“, pour mettre préalablement au point quelques notions théoriques.

Le questionnaire définitif avait la teneur suivante:

Questions principales.

1. Comment y a-t-il lieu de définir ce qu'on nomme la tension de rupture, l'intensité de rupture et éventuellement la puissance de rupture d'un interrupteur? Y a-t-il intérêt à expliciter le travail de rupture d'un interrupteur (énergie totale dissipée dans l'appareil pendant la rupture)?
2. Combien de fermetures et d'ouvertures successives sur court-circuit doit-on garantir pour un interrupteur, spécialement pour les interrupteurs à très haute tension, ou à très grande intensité. Quels intervalles de temps doit-on prévoir entre ces ouvertures et ces fermetures.
3. Avez-vous utilisé les interrupteurs avec résistances intercalaires, dites résistances de choc, dans quel but?
Quels avantages pensez-vous avoir retiré de l'emploi de ces résistances?
Avez-vous constaté des inconvénients paraissant provenir de ces dispositifs?
4. Temporisez-vous vos relais en vue de diminuer la puissance et, par là, le travail de rupture de vos interrupteurs à huile?
Quelle est la temporisation que vous estimez utile et admissible dans ce but?

Questions secondaires.

5. Avez-vous observé une relation entre la tenue de vos interrupteurs et l'état du point neutre, isolé ou mis à la terre, soit directement, soit à travers une résistance ou une inductance?
6. Avez-vous observé des inconvénients paraissant résulter de l'emploi de divers matériaux isolants tels que porcelaine, bois, bakelite, etc.?

¹⁾ *Allemagne*: Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechselstrom-Hochspannungsschaltgeräten, ETZ 1927, No. 23 et 24.

Angleterre: BESA 1923, No. 116.

Etats-Unis: AIEE 1925, No. 19.

France: USE 1924, No. 168.

Suisse: Directives pour le choix des interrupteurs des installations à c.-a. à haute tension, Bull. ASE 1924, No. 5 et 1925, No. 2. 2^{me} édition 1928 (tirage à part).

Les questions 5 et 6 ont été désignées comme étant d'intérêt secondaire, vu la difficulté d'obtenir à ce sujet des réponses basées sur des observations directement comparables.

Le dossier du questionnaire fut envoyé à 128 personnes ou associations, dont une soixantaine environ s'étaient annoncées pour participer à l'enquête. Les réponses reçues sont au nombre de 51; on trouvera dans la suite leur répartition entre pays.

Avant de passer à l'étude détaillée des réponses obtenues, il paraît utile de préciser tout d'abord quelques notions se rattachant au sujet de l'enquête, et d'insister sur les différences qui existent entre les prescriptions actuellement en vigueur dans divers pays (voir note 1 au bas de la page 718).

Rappel de quelques notions théoriques.

Tout court-circuit provoque des phénomènes transitoires dans le réseau qui en est le siège. Le calcul exact du courant de court-circuit et de son amortissement, ainsi que de la valeur instantanée de la force électromotrice agissant dans le circuit, présente des difficultés sérieuses, même pour les installations comportant un seul alternateur. Dans les réseaux bouclés, alimentés par plusieurs usines génératrices, les calculs exacts de ce genre deviennent inextricables. On se contente généralement de méthodes de calcul approchées²⁾, ou bien on se sert d'un modèle réduit du réseau considéré, composé de résistances équivalentes, avec lequel il est possible de déterminer rapidement l'intensité du courant de court-circuit, en un point donné du dit réseau de distribution. Quant à l'amortissement du courant, il est aisé d'en obtenir une valeur approximative à l'aide de courbes adéquates³⁾.

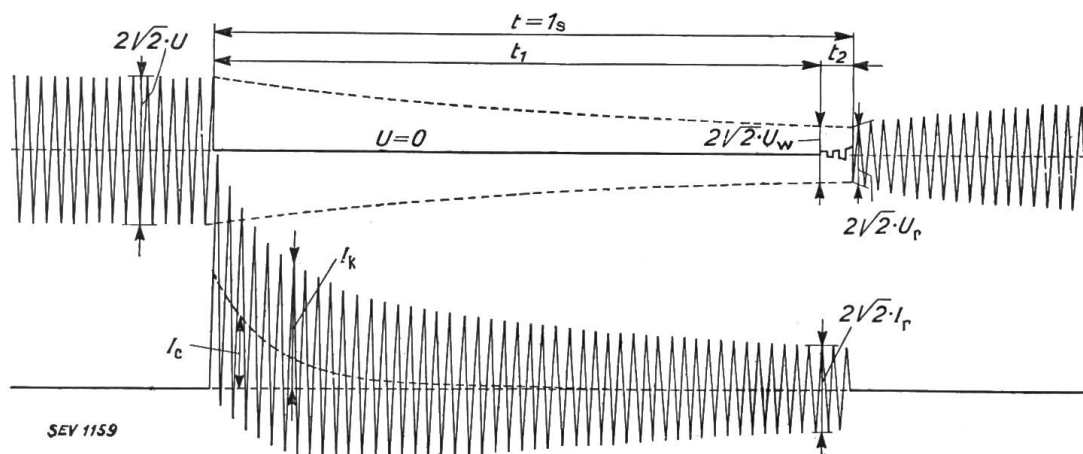


Fig. 1.

Oscillogrammes du courant et de la tension lors d'un court-circuit:

- U = tension avant le court-circuit;
- U_r = tension de rupture;
- U_w = tension induite au moment de la séparation des contacts;
- I_k = courant total de court-circuit égal à $\sqrt{I_c^2 + I_r^2}$ en valeur efficace;
- I_c = composante continue du courant de court-circuit;
- I_r = valeur efficace du courant alternatif de court-circuit au moment de la séparation des contacts;
- t = durée totale du court-circuit;
- t_1 = retard au déclenchement;
- t_2 = durée de l'arc.

²⁾ E.-M. Hewlett, J.-M. Mahoney et G.-A. Burnham: Rating and selection of oil circuit Breakers. Proceedings of the american Institute of electrical Engineers, 1918, t. XXXVII, p. 41-56.

Voir aussi: Directives pour le choix des interrupteurs des installations à courant alternatif à haute tension, Bull. A.S.E. 1924, No. 5 et 1925, No. 2, 2^{me} édition 1928 (tirage à part).

Règles allemandes: Methode zur Berechnung von Kurzschlussströmen und Schalterleistungen, E.T.Z. 1929, page 242.

³⁾ Par exemple: Proceedings of the american Institute of electrical Engineers 1918, Loc. cit. page 48.

Interrupteurs à huile: Comparaison

| Pos. | Objet | Allemagne | Amérique | Angleterre |
|------|--|--|---|---|
| 1 | Tension de rupture | Aucune donnée. | Aucune donnée. | Aucune donnée. |
| 2 | Courant de rupture. | No. 23 — page 818, § 27. „Der Ausschaltstrom ist der Effektivwert des Stromes, der zu Beginn der Trennung der Schaltstücke im Schaltgerät fließt (grösste Halbwelle).“ | Page 7, § 19—104. „The interrupting rating of an oil circuit breaker is a rating based upon the highest r. m. s. current at normal voltage the breaker can interrupt under the operating duty specified. The current value taken shall be that existing during the first half cycle of arc between contacts during the opening stroke.“ | Page 8, § 30—31. „. the actual current at the time of separation of the contacts . . .“ |
| 3 | Puissance de rupture. | No. 23 — page 818, § 27. „Die Ausschaltleistung eines Schalters in kVA ist das Produkt des Ausschaltstromes und der im Stromkreis wirksamen Spannung bei Beginn der Trennung der Schaltstücke, beide in Effektivwerten gemessen, mit dem Zahlenfaktor der Stromart multipliziert (bei Drehstrom $\sqrt{3}$). Bei kurzer Lichtbogendauer ist die wirksame Spannung nahezu gleich der wiederkehrenden Spannung nach vollendetem Ausschalten.“ | Page 7, § 19—104. „The interrupting rating of an oil circuit breaker is rating based upon the highest r. m. s. current at normal voltage the breaker can interrupt under the operating duty specified. The current value taken shall be that existing during the first half cycle of arc between contacts during the opening stroke.“ | Page 8, § 31. „The breaking (interrupting or rupturing) capacity of an oil immersed circuit breaker is the maximum kVA which the circuit breaker will break, under prescribed conditions, at stated intervals, a specified number of times. The value of the maximum kVA is the product of the working voltage in kilovolts, and the actual current at the time of separation of the contacts, multiplied by 1, 1.73 or 2 for single phase, three-phase or two-phase systems respectively.“ Note: RMS values of current and voltage shall be taken. |
| 4 | Nombre et intervalles entre les enclenchements et les déclenchements successifs. | No. 24 — page 855, § 74. „Ölschalter müssen die angegebene Nennausschaltleistung bei der nachstehenden Folge von Schaltvorgängen ausschalten können: Ausschalten des Kurzschlusses: 3 min. Pause, Einschalten auf Kurzschluss u. Ausschalten des Kurzschlusses: 3 min. Pause, Einschalten auf Kurzschluss u. Ausschalten d. Kurzschlusses . . . Zwischen die Ausschaltung u. Wiedereinschaltung muss eine Pause von mind. 3 min. gelegt werden Diese Probe kann nach erfolgter Ueberholung im ganzen dreimal verlangt werden.“ | Page 7, § 19—107. „The standard operating duty of an oil circuit breaker shall of two unit operating cycles at a two-minute interval.“ „Each unit operating cycle shall consist of a closing of the circuit breaker followed immediately by its opening without purposely delayed action.“ | Page 18, § 52. „The circuit breaker shall interrupt its rated kVA breaking capacity twice at a two-minute interval, and then shall be in a condition to be closed, and carry its rated current until it is practicable to inspect it and make necessary adjustments.“ |
| 5 | Etat des interrupteurs après les essais de rupture. | No. 23 — page 818, § 27. „. . . Die Einschaltfestigkeit des Schaltgerätes muss den Kraft- und Wärmewirkungen des Stoss- und Dauerkurzschlussstromes gewachsen sein, ohne dass Abhebung oder Verschweissen der Schaltstücke eintritt.“ | Page 7, § 19—106b. „At the end of any performance at or within its interrupting rating, the circuit breaker shall be in the following condition: 1. Mechanical: the breaker shall be substantially in the same mechanical condition as at the beginning. 2. Electrical: the breaker shall be capable of carrying rated voltage, and its main current carrying parts shall by substantially in the same condition as at the beginning. After performance at or near its interrupting rating, the interrupting ability of the breaker may be materially reduced and it is not to be inferred that it may be re-closed after such performance without inspecting and, if necessary, making repairs.“ | Aucune donnée. |
| 6 | Liste des prescriptions | Projet III du VDE: „Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechselstromhochspannungsschaltgeräten.“ ETZ, No. 23 — 24/1927. | AIEE-No. 19/1925. | BESA-No. 116/1923. |

des Prescriptions de différents pays.

Tableau I.

| France | Suisse | Règles d'unification internat. proposées | Remarques |
|---|--|--|---|
| Aucune donnée. | Page 3, § 2. „La tension de rupture est la valeur efficace de la tension qui, lors d'un déclenchement, apparaît sur la ligne d'arrivée, immédiatement après l'extinction des arcs sur toutes les phases.“ | La tension de rupture est définie par la valeur efficace de la tension qui se rétablit en amont du disjoncteur immédiatement après la rupture des arcs sur toutes les phases. | |
| Aucune donnée. | Page 3, § 2. „Le courant de rupture désigne la valeur efficace de la composante alternative du courant qui traverse l'interrupteur lors d'un déclenchement, au moment de la séparation des contacts.“ | Le courant de rupture désigne la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit traversant l'interrupteur lors d'un déclenchement au moment de la séparation des contacts. | |
| Page 27, § 1059. „On appelle pouvoir de coupure d'un interrupteur le courant maximum que cet interrupteur peut couper sous une tension déterminée. Le pouvoir normal de coupure d'un interrupteur est défini par le courant maximum que cet interrupteur peut couper sous sa tension normale“ | Page 13, § 4b. „La puissance de rupture correspondant à un courant de court-circuit et à une tension de rupture donnés s'obtient comme suit: Pour les réseaux monophasés : $P_{rd} = I_{rd} V_{rd}$. Pour les réseaux triphasés : $P_{rd} = I_{rd} V_{rd} \sqrt{3}$. I_{rd} = le courant permanent de c.-c. V_{rd} = la tension induite (tension de rupture en court-circuit permanent) en kV mesurée entre les conducteurs extérieurs. P_{rd} = la puissance de rupture en c.-c. permanent en kVA pour toutes les phases ensemble.“ | La définition de la capacité de rupture d'un interrupteur résulte, d'une part, de la tension de rupture et de l'intensité de rupture, d'autre part, de la garantie du nombre et des intervalles entre les enclenchements et déclenchements successifs. En kVA, la capacité de rupture d'un appareil mono-di-triphasé peut être exprimée par les produits de la tension de rupture par le courant de rupture, multiplié respectivement par le facteur correspondant au système, d'après les formules : $I_r U_r$, $2 I_r U_r$ et $\sqrt{3} I_r U_r$. | *) Pour les calculs, on peut admettre que la tension de rupture V_r est proportionnelle au courant de c.-c. I_k pendant toute la durée de l'amortissement de ce courant. La tension induite tout au début du c.-c. est approximativement égale à la tension de service V , la tension de rupture à un moment quelconque sera donnée par la formule $V_r = V \frac{I_r}{I_{ri}}$ (I_{ri} = courant initial de court-circuit.) |
| Page 28, § 1062. „L'absence d'indication relative au nombre de coupures impliquera que ce nombre est de trois.“ | Page 5, § 3d. „L'interrupteur doit pouvoir supporter à intervalles d'une minute trois déclenchements et deux enclenchements successifs, le courant de rupture et le courant initial de court-circuit ne dépassant pas les limites fixées.“ | Les disjoncteurs à huile doivent pouvoir couper 3 fois la puissance de coupure nominale garantie, aux intervalles indiqués ci-après co-l'-oco-l'-co, le courant initial ne dépassant pas les limites fixées. 1. Coupure: 1 minute d'intervalle. 2. Enclenchement sur le court-circuit suivi immédiatement de la disjonction, 1 minute d'intervalle. 3. Répétition de l'opération 2. | |
| Page 27, § 1060. „Lors d'une coupure à pouvoir normal, les seules détériorations admises sont celles des pièces de l'appareil sur lesquelles l'arc prend naissance et des pièces destinées à en limiter le développement. Dans les appareils à huile, aucune projection d'huile en dehors de son récipient n'est admissible.“ | **) „Après les essais, l'interrupteur doit pouvoir encore être employé en service normal. Avant de nouveaux enclenchements ou déclenchements sous fort courant, on devra ouvrir l'interrupteur et, s'il y a lieu, le réparer.“ | Aucune revision ne doit être nécessaire au cours de ces manœuvres. L'appareil devra pouvoir être encore employé en service normal et, au point de vue mécanique, fonctionner correctement. Une revision comportant, s'il y a lieu, le remplacement de l'huile et des contacts doit être faite après chaque cycle complet. | **) Voir Bulletin de l'A. S. E. No. 2/1925, page 76. |
| USE-No. 168/1924. | „Directives pour le choix des interrupteurs des installations à courant alternatif à haute tension.“ A. S. E. 1924. | Suggestions du Comité Suisse chargé de l'Enquête sur les interrupteurs à huile. | |

Pour rappeler brièvement les phénomènes, considérons l'oscillogramme de la fig. 1 qui représente l'allure du courant et de la tension lors de la rupture différée d'un court-circuit. La tension induite U et le courant de court-circuit s'amortissent rapidement, la composante continue I_c de ce dernier étant pratiquement négligeable déjà au bout de 0,20 s. La courbe d'amortissement de la tension induite a été tracée en admettant, pour simplifier, que le rapport $\frac{U}{I_r}$ reste constant pendant

toute la durée de la période transitoire, I_r désignant la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit. Cette hypothèse n'est pas tout à fait exacte par suite de la diminution de l'impédance de fuite qui se manifeste au début du court-circuit du fait de la saturation, mais est suffisante dans la pratique.

En ce qui concerne les tensions, on distingue la tension de régime U , celle de rupture U_r et la tension induite ou „active“ U_w . La tension U_r qui s'établit sur la ligne d'arrivée, immédiatement après l'extinction des arcs sur tous les pôles, diffère d'autant plus de la tension de régime U que la durée du court-circuit est plus élevée. La différence $U - U_r$ est maximum lorsque la coupure a lieu après l'amortissement total du courant transitoire. La tension induite ou la tension active U_w , qui agit dans le circuit au moment de la séparation des contacts de l'interrupteur, peut être sensiblement supérieure à la tension de rupture U_r , si la durée t_2 de l'arc et la durée totale du court-circuit sont de même ordre de grandeur. C'est le cas généralement pour les interrupteurs dans l'huile de n'importe quel système dans les installations à haute et très haute tension, lors des déclenchements instantanés.

En cas de court-circuit sur une petite dérivation d'un réseau de très grande capacité de distribution, l'amortissement du courant alternatif n'existe pratiquement pas, de sorte que le courant de régime (courant permanent de court-circuit) peut s'établir dès le début du phénomène. Les trois tensions U , U_w et U_r sont alors à peu près égales.

On peut définir le *courant de rupture* de trois manières sensiblement différentes les unes des autres. Tant qu'il s'agit d'une rupture instantanée, se produisant encore avant l'amortissement complet de la composante exponentielle (continue), la

valeur efficace du courant traversant l'interrupteur au moment de la séparation des contacts, ou durant la première demi-onde pendant la rupture, s'exprime par la formule:

$$I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$$

I_c étant la composante continue et I_r la valeur efficace de la composante alternative (fig. 2a), la racine ci-dessus n'étant applicable en toute rigueur que si l'on fait abstraction de l'amortissement des deux composantes I_c et I_r .

Dans les règles allemandes, on a introduit pour le courant de rupture la valeur efficace I_D de la demi-onde de plus grande amplitude résultant de la superposition de la composante exponentielle du courant avec l'onde alternative de même sens traversant l'interrupteur à l'instant de la séparation des contacts, ou celle de la première demi-onde de plus grande amplitude se produisant après cette séparation. La définition graphique de I_D est représentée par la fig. 2b, expression de la formule:

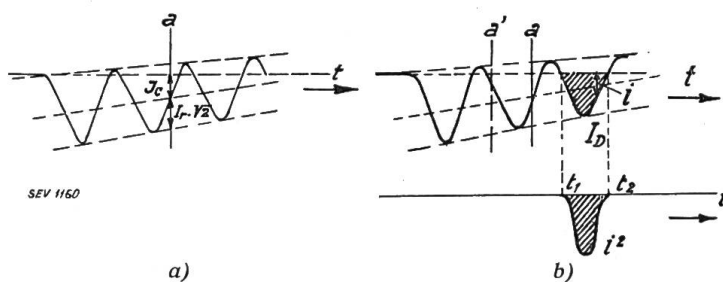


Fig. 2.

Définition du courant de rupture:

$$a) \quad I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2} \quad b) \quad I_D = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt}$$

a = Instant de la séparation des contacts.

$$I_D = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt}$$

Les règles en question ne précisent pas quand il faut appliquer l'une ou l'autre de ces suppositions.

En troisième lieu, il est loisible, pour différentes raisons, de désigner comme courant de rupture la valeur efficace I_r de la composante alternative seulement, cette valeur étant lue à l'instant de la disjonction des contacts de l'interrupteur ou pendant la première demi-onde de l'existence de l'arc de rupture.

Remarquons encore que le coefficient d'amortissement du courant de court-circuit dépend des caractéristiques du circuit et, en particulier, de la construction des alternateurs.

Lors d'une rupture différée, même d'une demi-seconde, la composante continue I_c sera généralement amortie encore avant l'ouverture de l'interrupteur, à tel point que les trois courants I_k , I_D et I_r définis ci-dessus auront des valeurs pratiquement identiques. Il n'y a donc de différence que tant qu'il s'agit de ruptures instantanées, dont on use volontiers au cours des essais des interrupteurs, afin de provoquer la rupture avant l'amortissement de la période transitoire, c.-à-d. tant que le courant de court-circuit reste voisin de sa valeur initiale très élevée. La constante de temps de la composante continue du courant de court-circuit est sensiblement plus faible que celle de la composante alternative et la différence entre ces constantes de temps est généralement d'autant plus grande que l'endroit du court-circuit est plus éloigné des points d'alimentation.

Pour des courts-circuits triphasés, il y a évidemment lieu de mesurer I_k et I_D sur toutes les trois phases, étant donné que l'asymétrie, et par conséquent les valeurs de I_c , sont différentes d'une phase à l'autre. On définira comme courant de rupture la moyenne arithmétique I_{km} ou I_{Dm} des trois courants.

Aperçu comparatif des prescriptions en vigueur.

Dans le tableau I sont reproduites les définitions du pouvoir de rupture, de la tension de rupture, ainsi que du courant de rupture, telles qu'elles sont données par les différents règlements.

Ces diverses définitions du pouvoir de rupture P peuvent être représentées à l'aide des formules suivantes :

Allemagne :

$$\left. \begin{aligned} P_{D1} &= I_D U_w, \text{ pour un système monophasé } \\ P_{D3} &= \sqrt{3} I_D U_w, \text{ pour un système triphasé } \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Angleterre :

$$\left. \begin{aligned} P_{A1} &= I_k U \text{ pour un système monophasé } \\ P_{A3} &= \sqrt{3} I_k U \text{ pour un système triphasé } \\ P_{A2} &= 2 I_k U \text{ pour un système biphasé } \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Suisse :

$$\left. \begin{aligned} P_{S1} &= I_r U_r \text{ pour un système monophasé } \\ P_{S3} &= \sqrt{3} I_r U_r \text{ pour un système triphasé } \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ces pouvoirs de rupture s'entendent en kVA, les courants étant exprimés en A et les tensions en kV.

Bien que les „Standards of the AIEE“ ne parlent pas du pouvoir de rupture (exprimé en kVA) des interrupteurs à huile, il est cependant d'usage courant aux Etats-Unis d'indiquer en kVA la puissance coupée par les interrupteurs. Pour calculer ces kVA en partant des valeurs de la tension et du courant mesurés, on se sert de formules identiques à celles appliquées en Angleterre.

La définition du courant de rupture dans les prescriptions françaises⁴⁾ n'est pas assez précise pour qu'il soit possible d'interpréter sans ambiguïté ce que l'on doit entendre par le courant maximum que peut couper l'interrupteur sous sa tension normale. D'après le compte-rendu d'essais d'interrupteurs dans l'huile, publié en 1927 par l'Union des Syndicats de l'Electricité avec le concours du Laboratoire central d'Electricité et de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité, ce courant maximum correspondrait à l'amplitude du courant dans la première onde avant le décrochement de la courbe de tension.

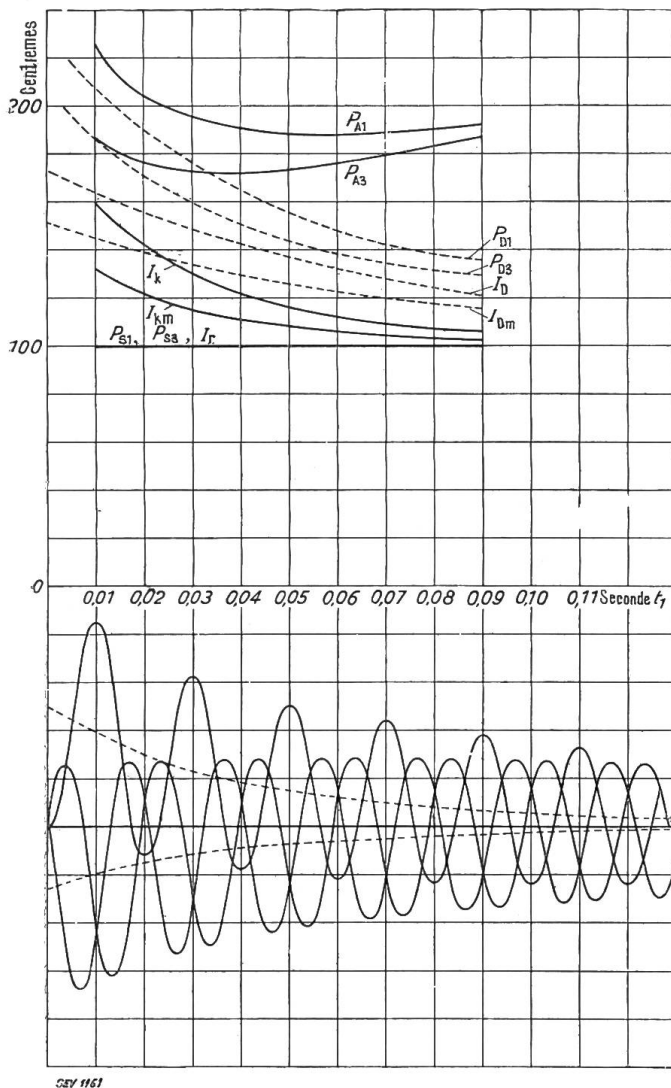


Fig. 3.

Représentation graphique des variations de l'augmentation relative des courants I_k et I_D par rapport au courant I_r , et des pouvoirs de rupture P_{A1} , P_{A3} , P_{D1} , P_{D3} , par rapport aux pouvoirs de rupture P_{S1} et P_{S3} , en fonction du retard au déclenchement t_1 lors des coupures instantanées des courants représentés par l'oscillogramme tracé sous l'axe des abscisses. L'amortissement de la tension de rupture est proportionnel à l'amortissement de la composante alternative du courant.

anglaises et 217 % d'après les prescriptions allemandes pour $t_1 = 0,01$ s, et 190 % et 135 % pour $t_1 = 0,09$ s. Les différences sont encore plus marquées si t_2 est supérieur à 0,04 s.

Le calcul du pouvoir de rupture d'un interrupteur par une méthode analytique ou expérimentale (basée sur l'expérience d'essais méthodiques) n'étant pas encore d'un usage général, on cherche de plus en plus à vérifier la capacité de rupture des interrupteurs par une épreuve directe avec des puissances de court-circuit voisines des chiffres garantis. Malgré l'intérêt considérable que présentent ces épreuves pour les exploitants, il n'arrive qu'exceptionnellement, surtout en Europe, que ces essais puissent être effectués sur des réseaux suffisamment puissants. L'ouverture de l'interrupteur est pour cette raison souvent provoquée déjà au bout de 0,01 à 0,02 s après l'enclenchement, c.-à-d. avant l'amortissement de la période transitoire.

Afin de comparer les différentes définitions, nous avons calculé les courants de rupture, ainsi que les pouvoirs de rupture suivant les diverses prescriptions en partant de l'oscillogramme représenté sur la fig. 3, et en faisant varier le temps t_1 du retard au déclenchement. Cette étude suppose une durée d'extinction des arcs, t_2 , de 0,04 s et lors des courts-circuits monophasés une asymétrie complète du courant. En rapportant les chiffres obtenus à la puissance de court-circuit, calculée d'après les directives suisses qui donnent les valeurs les plus faibles, on voit que les écarts atteignent, pour l'oscillogramme considéré, 227 % d'après les prescriptions

⁴⁾ Règles de normalisation du gros appareillage électrique, arrêtées par l'Union des Syndicats de l'Electricité.

Les courbes de la fig. 3 montrent clairement que les chiffres obtenus pour le pouvoir de rupture, calculé en partant d'un même oscillogramme, sont bien différents suivant qu'ils sont établis d'après l'une ou l'autre des définitions. Ces résultats montrent en outre l'intérêt qu'il y a à chercher une formule ou une définition qui puisse réunir tous les suffrages.

Notion du travail de rupture.

L'établissement d'une définition rationnelle du pouvoir ou de la capacité de rupture se heurte à de sérieuses difficultés, qui n'ont pas été aplanies complètement jusqu'ici par l'introduction d'une notion nouvelle servant de critère. D'ailleurs, à aucune des définitions données par les formules rappelées plus haut, on ne peut appliquer le terme de „puissance“ de l'interrupteur sans commettre une erreur, puisque ni la tension de service U , ni la tension U_w qui agit dans le circuit au moment de la séparation des contacts, ni la tension de rupture U_r qui réapparaît après l'extinction des arcs, n'existent aux bornes de l'interrupteur à l'instant de son ouverture et pendant toute la durée de la coupure. Les produits indiqués dans ces formules, bien qu'homogènes à une puissance, ne correspondent pas à une puissance réelle.

Examinons quelques-unes des solutions qui ont déjà été proposées.

Si l'on considère par exemple l'énergie dissipée à l'intérieur de l'interrupteur dans les arcs de rupture et donnée par l'intégrale bien connue

$$A = \int_{t=0}^{t=n\frac{T}{2}} ie_1 dt \text{ en joules,} \quad (4)$$

e_1 étant la chute de tension dans les arcs, en volts, T la durée d'une période du courant alternatif, en secondes, $n\frac{T}{2}$ celle de l'arc, i la valeur instantanée du courant, cette énergie est bien définie et peut être facilement mesurée à l'aide d'un wattmètre balistique ou enregistreur. Le travail de rupture A détermine la quantité de chaleur dégagée dans l'interrupteur lors d'une coupure et, par là, la contrainte que subit ce dernier; il semblerait donc qu'un classement simple et précis de ces appareils pourrait être fait en indiquant la quantité d'énergie A en joules ou en calories qu'un interrupteur doit être en mesure de supporter sans danger. Malheureusement, des inconvénients sérieux s'opposent à cette façon de procéder. L'intégrale (4) donne la quantité d'énergie A , mais n'indique pas à l'exploitant si un interrupteur, capable en soi de supporter les contraintes correspondant à cette quantité de chaleur, convient pour la tension de service et le courant de court-circuit de son réseau.

En écrivant avec B. Bauer⁵⁾

$$A = cI_r U_r t_2 \quad (5)$$

on exprime, il est vrai, le travail de rupture en fonction de deux facteurs I_r et U_r , caractérisant un réseau; mais il reste comme inconnues la durée t_2 de l'arc et le coefficient c . Or, en examinant les résultats de recherches expérimentales, il ne semble pas qu'il soit pratiquement possible de prédéterminer t_2 , la durée de l'arc, pour une tension U_r et un courant I_r à l'aide d'une seule formule. En outre, il paraît très difficile d'indiquer d'une façon suffisamment précise la grandeur du coefficient c , qui peut varier d'un système d'interrupteur à l'autre.

On ne peut donc pas établir une formule unique exprimant le travail de rupture A en fonction de I_r et U_r , indépendamment de la construction des interrupteurs. L'exploitant est donc obligé de spécifier dans sa commande les deux valeurs I_r et U_r , caractérisant son réseau, ou bien encore, en les multipliant, exiger un interrupteur d'un pouvoir de rupture déterminé pour une tension donnée.

⁵⁾ B. Bauer: Untersuchungen an Oelschaltern. Bull. de l'A.S.E. 1915, t. VI, p. 137.

Résultats de l'enquête.

Le résultat du dépouillement des réponses reçues se résume comme suit:

QUESTION 1.

a) Définition de la « tension de rupture ».

Nombre total de réponses 51.

Réponses ne touchant pas la question 16.

Sur 35 réponses qui abordent la question de la tension de rupture:

31, soit 88,5 % optent pour la définition correspondant à la valeur de U_r de la fig. 1.

3, soit 8,5 % proposent la tension de service U .

1 réponse préfère la tension induite U_w , tout en reconnaissant la valeur U_r comme étant plus juste.

Sur les 31 réponses optant pour la tension U_r

4 soulignent l'importance qu'on doit attacher à indiquer, au moment de la commande des interrupteurs, la tension de service U comme tension de rupture.

1, bien que partisan de la tension U_r , se rallierait cependant à n'importe quelle définition, pourvu qu'elle soit universellement adoptée⁶⁾.

Les 35 réponses peuvent être groupées comme suit:

Tableau II.

| | Angleterre | | Danemark | | Espagne | | Etats-Unis | | France | | Russie | | Roumanie | | Suisse | |
|---------------------------|------------|---------|----------|---------|---------|---------|------------|---------|--------|---------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|
| | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension | Nombre | Tension |
| Exploitants | | | | | (1) | — | | | 12 | U_r | | | | | 7 | U_r |
| Construc- teurs . . . | | | | | | | 1 | U | 5 | U_r | | | | | 3 | U_r |
| Services de recherches | 1 | U_r | 1 | U_r | | | | | 1 | U_r | 1 | U_w | 1 | U_r | 1 | U_r |

b) Définition du « courant de rupture ».

Nombre total de réponses 51.

Réponses ne touchant pas la question 17.

Sur 34 réponses qui abordent la question de l'intensité de rupture:

25, soit 73,5 % optent pour le courant de rupture I_r de la fig. 1.

5, soit 15 % optent pour le courant de rupture I_k

$$I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$$

3, soit 9 % optent pour le courant de rupture I_D

1 réponse propose comme courant de rupture la valeur moyenne de l'intensité efficace du commencement à la fin de la rupture.

Dans 3 réponses sur 17 que nous avons dû laisser de côté, on parle „de la valeur efficace de l'intensité au moment de la séparation des contacts“, sans préciser comment cette valeur efficace doit être définie.

La distribution de ces 34 réponses suivant les pays est donnée par le tableau suivant:

⁶⁾ Une remarque analogue est faite également dans une autre réponse qui ne précise pas autrement son opinion au sujet de la tension de rupture.

Tableau III.

| | Angleterre | | Danemark | | Espagne | | Etats-Unis | | France | | Russie | | Roumanie | | Suisse | |
|-----------------|------------|---------|----------|---------|---------|---------|------------|---------|--------|-----------------------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|
| | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant | Nombre | Courant |
| Exploitants . . | | | | | (1) | — | | | 11 | I_r | | | | | 6 | I_r |
| | | | | | | | | | 1 | I_k | | | | | 1 | I_D |
| | | | | | | | | | 1 | I_D | | | | | | |
| Constructeurs | 1 | I_k | | | | | 1 | I_k | 1 | I_D I_k | | | | | 2 | I_r |
| | | | | | | | | | 1 | $\frac{I_D + I_r}{2}$ | | | | | 1 | I_k |
| | | | | | | | | | 2 | I | | | | | | |
| Recherches . . | 1 | I_r | 1 | I_r | | | | | | | 1 | I_r | 1 | I_k | 1 | I_r |

*) Où I_D désigne la valeur efficace du courant pendant la dernière demi-onde avant l'extinction des arcs.

Ici également, deux réponses acceptent n'importe quelle définition, pourvu qu'elle rallie tous les suffrages. Toutefois, la préférence est donnée au courant de rupture I_r .

c) Définition de la « puissance » ou du « pouvoir de rupture ».

Nombre total de réponses 51.

Réponses qui ne touchent pas la question 5⁷⁾.

Sur 46 réponses,

35, soit 76 % acceptent la notion du pouvoir de rupture exprimé en kVA,

5, soit 11 % s'opposent à la définition du pouvoir de rupture désigné par un nombre de kVA et trouvent que les caractéristiques telles que courant et tension de rupture doivent seules être employées pour classer les interrupteurs,

5, soit 11 % trouvent qu'il faut désigner le pouvoir de rupture par le courant et la tension de rupture,

1 opinant est d'avis que la puissance de rupture ne caractérise pas suffisamment le fonctionnement de l'interrupteur et devrait, pour cette raison, être complétée par la valeur du travail de rupture.

Parmi les réponses qui définissent plus exactement la notion du pouvoir de rupture :

| | | |
|----|--|----------------------------------|
| 18 | optent pour le produit défini par la formule | $I_r U_r$ |
| 4 | » | $I_D U_r$ |
| 1 | » | $I_k U_r$ |
| 1 | » | $\sqrt{2} I_a U_r$ ⁸⁾ |
| 1 | » | $I_D U_w$ |

quand il s'agit de court-circuit monophasé. Quant au court-circuit triphasé, 25 réponses proposent la définition résultant des formules ci-dessus multipliées par $\sqrt{3}$.

Outre l'expression *puissance* ou *pouvoir de rupture*, on propose aussi le terme de *capacité de rupture*. D'autre part, dans une réponse on parle de *puissance apparente de rupture*, dans une autre on fait la distinction entre *puissance nominale de rupture* et *puissance de rupture*, la puissance nominale de rupture étant égale au produit du courant efficace maximum par la tension nominale que l'interrupteur est en état de rompre dans les conditions prescrites (la tension de rupture étant posée égale à la tension nominale de l'appareil).

7) Seules les réponses qui n'abordent pas du tout la question de la puissance de rupture ont été laissées de côté. Par contre, nous avons conservé celles où il est question du pouvoir de rupture des interrupteurs exprimé en kVA, bien que souvent la manière de calculer ces kVA ne soit pas mentionnée.

8) $\sqrt{2} I_a$ désigne l'amplitude maximum du courant initial de court-circuit que l'interrupteur doit être en état de couper sans dommage pour lui.

Notons encore que 3 des réponses acceptent n'importe quelle formule déterminant la capacité de l'interrupteur, pourvu qu'elle rallie tous les suffrages.

Quant aux 5 réponses qui sont opposées à la notion de la puissance, elles se basent surtout sur des considérations d'ordre théorique et rappellent que cette puissance ne correspond pas à la réalité, étant donné que le courant et la tension de rupture qu'on introduit dans la formule ne sont pas simultanés; en outre, ce produit ne fournit à lui seul aucune indication utile et pourrait être cause d'erreurs et de malentendus. La multiplication par $\sqrt{3}$ dans le cas de court-circuit triphasé est considérée comme absurde par une des réponses.

d) Y a-t-il intérêt à expliciter le travail de rupture?

Sur 51 réponses, 17 ne s'intéressent pas à la question. Parmi les 34 autres réponses:

- 25 sont d'avis qu'il n'y a pas lieu d'indiquer le travail de rupture, dont la valeur n'intéresse que le constructeur et est sans importance au point de vue de l'exploitant,
- 9, par contre, trouvent qu'en spécifiant le travail de rupture on aura une indication utile sur le fonctionnement de l'interrupteur.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 1.

Après un examen minutieux des réponses, les rapporteurs croient pouvoir formuler les conclusions suivantes:

a) Tension de rupture.

Sur ce point, les réponses obtenues sont très concluantes, puisqu'environ 90% des opinants proposent comme tension de rupture la tension efficace U_r , rétablie immédiatement après l'extinction des arcs. Les considérations qui parlent en faveur de cette définition peuvent se résumer comme suit:

- 1° La définition de la tension de rupture devant autant que possible correspondre aux contraintes subies par l'interrupteur lors d'une coupure, c'est bien la tension U_r dont il faut tenir compte, puisque le réamorçage des arcs à chaque passage du courant alternatif par zéro est provoqué par cette tension même.
- 2° La tension de service U a généralement des valeurs sensiblement différentes de la tension U_r rétablie après la rupture du court-circuit. En particulier, cette différence peut être très importante si le court-circuit est accompagné du pompage ou du décrochage des alternateurs ou des compensateurs synchrones de phase. Il n'y a pas de rapport fixe entre la valeur de la tension de service avant le court-circuit et celle qu'elle a tout de suite après; la capacité de rupture d'un interrupteur ne saurait donc être exprimée à l'aide de cette tension, susceptible d'induire en erreur.
- 3° Quelques auteurs attachent de l'importance à ce que la tension de service soit introduite comme tension de rupture dans les cahiers des charges relatifs à la fourniture des interrupteurs. On tiendrait compte ainsi des conditions de service les plus défavorables et on simplifierait sensiblement les calculs à effectuer pour fixer la capacité de rupture de l'interrupteur prévu pour un endroit donné du réseau. Une installation dont toutes les parties seraient établies d'après ce principe aurait l'avantage de se prêter plus facilement aux agrandissements éventuels.

Les objections qu'on a formulées dans quelques réponses au sujet de la tension de rupture U_r , à savoir que cette quantité, d'une part, ne peut être utilisée pratiquement comme caractéristique pour une commande d'interrupteur et, d'autre part, que la détermination analytique de l'amortissement de la tension exige des calculs assez compliqués, perdent de leur signification si l'on admet le principe qui vient d'être formulé.

- 4⁰ La tension active U_w qui agit dans le circuit au moment de l'ouverture des contacts peut également être différente de la valeur de la tension rétablie U_r , cette différence étant essentiellement variable et dépendant de la durée des arcs, des caractéristiques du réseau en général et des relais en particulier.

D'ailleurs, une mesure directe de la tension U_w n'étant pas possible, on est obligé, même lorsque les ruptures sont accompagnées de prises oscillographiques, d'effectuer des calculs plus au moins justifiés pour déterminer la valeur cherchée de la tension active. La définition de cette tension ne présente de ce fait que peu d'intérêt pratique.

b) Courant de rupture.

L'enquête a donné aussi un résultat positif au sujet de la définition du courant de rupture. Les trois quarts des réponses se prononcent en effet en faveur du courant de rupture défini comme étant la valeur efficace de la composante alternative I_r du courant traversant l'interrupteur à l'instant de la séparation des contacts. Cette définition est motivée par les considérations suivantes :

- 1⁰ La rupture des courts-circuits ne se faisant pas instantanément dans la pratique, à cause du retard dû à l'inertie de l'interrupteur et au temps exigé pour le fonctionnement des relais de la protection sélective, la composante exponentielle continue du courant de court-circuit est généralement complètement amortie avant la séparation des contacts de l'interrupteur. En faisant le calcul du courant de rupture, qui donne d'ailleurs seulement la valeur de la composante alternative, l'exploitant n'a donc pas besoin de s'occuper de la composante continue, dont la grandeur est par surcroît essentiellement variable suivant l'instant où s'établit le court-circuit. *Il est bien entendu qu'un interrupteur prévu pour un courant de rupture donné doit pouvoir fonctionner correctement quelle que soit la phase par laquelle passe le courant au moment de l'établissement du court-circuit.*
- 2⁰ Une question assez complexe est celle de déterminer la part de chaleur dégagée par les arcs de rupture provenant de la composante continue du courant asymétrique de court-circuit lors d'une rupture instantanée; elle peut être étudiée par les méthodes graphiques avec une approximation qui semble être suffisante pour la pratique⁹⁾. Lorsqu'une composante continue se superpose au courant alternatif, l'énergie dissipée dans les arcs peut être sensiblement plus grande ou plus petite que l'énergie dégagée lors de la rupture d'un courant alternatif pur de même amplitude que l'onde alternative. Les écarts dépendent de la durée totale des arcs et du moment du déclenchement; ils sont particulièrement grands pour une durée d'arc se composant d'un nombre impair de demi-ondes. A priori, il ne semble pas que l'augmentation du travail de rupture puisse se produire plus souvent que sa diminution. D'autre part, si l'on détermine le courant de rupture en se servant de l'expression $I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$, ou bien en employant la valeur efficace I_D de la demi-onde de plus grande amplitude, la valeur des rapports $\frac{I_k}{I_r}$ et $\frac{I_D}{I_r}$ dépasserait de beaucoup l'augmentation relative du travail de rupture, due à l'influence de la composante exponentielle I_c .
- 3⁰ Si le courant de court-circuit possède pendant la rupture une forte composante continue, son passage par zéro se produit au moment où la tension induite à une valeur relativement faible; dans certains cas, cette tension peut même être égale à zéro, l'extinction de l'arc est de ce fait facilitée et les contraintes subies par l'interrupteur sont réduites en conséquence. En tenant compte du courant continu I_c , on obtiendrait cependant des valeurs du courant de rupture I_k ou I_D supérieures au courant I_r .

⁹⁾ Voir Dr. J. Kopeliovitch: Ueber die Notwendigkeit einer einheitlichen internat. Definition der Abschaltleistung von Oelschaltern. Bull. A. S. E. 1928, 7 mai, t. XIX pp. 277–291. Le même article en français RGE 1928, No. 17, p. 625–637.

- 4° A première vue, il semblerait plus logique de définir le courant de rupture par la valeur moyenne arithmétique du courant alternatif au début et à la fin de la rupture. Si, toutefois, on tient compte du fait que la plus grande partie de la chaleur dégagée par les arcs se produit vers la fin de la coupure, on voit que, dans cette définition du courant de rupture, il y aurait également une part d'arbitraire. En outre, le calcul analytique du courant de court-circuit pour un point du réseau ne donne que la valeur efficace de la composante alternative au début, cette valeur à la fin de la rupture étant en outre fonction de la résistance des arcs.
- 5° Il est difficile de déterminer par voie analytique la loi assez complexe de l'amortissement du courant de court-circuit. Pour calculer le courant de rupture en partant du courant initial de court-circuit, on pourra se servir de courbes se basant sur des expériences faites dans ce but.

c) *Puissance de rupture.*

La définition de la capacité de rupture d'un interrupteur comme étant le produit du courant de rupture par la tension de rupture, homogène en soi à une puissance, et exprimé par un nombre de kVA, a réuni 76 % d'obtants. La plupart sont d'accord d'accepter la formule $I_r U_r$ en monophasé, $\sqrt{3} I_r U_r$ ($U_r = \sqrt{3} U_{ph, r}$) en triphasé et $2 I_r U_r$ en biphasé.

Bien que la notion de la puissance ou du pouvoir de rupture ne soit pas indispensable, elle s'est introduite dans l'usage général de la plupart des pays et a été formulée dans plusieurs règlements. Elle ne présente, en effet, aucune ambiguïté et ne peut donner lieu à aucun malentendu si l'on a soin de préciser que le chiffre de kVA indiqué se rapporte à une tension de rupture et à un système de courant (mono-, bi- ou triphasé) déterminé.

Quant à la multiplication par $\sqrt{3}$ du produit $I_r U_r$ dans un réseau triphasé, il y a lieu de noter que la tension de réamorçage peut théoriquement atteindre la valeur de 1,5 fois la tension de phase. En indiquant le pouvoir de rupture de l'interrupteur en système triphasé, le constructeur doit tenir compte de ce phénomène: Pour obtenir la puissance apparente rompue par un interrupteur en court-circuit triphasé, il faudrait donc multiplier le produit $I_r \cdot U_{ph, r} = I_r \cdot \frac{U_r}{\sqrt{3}}$, non pas par 3, mais par $1,5 \cdot 3 = 4,5$. Par $U_{ph, r}$ on entend la valeur de la tension étoilée de rupture. Remarquons toutefois que dans une même installation, avec la même puissance de machines, mais en connectant le point de court-circuit au point neutre du système, on réduit la tension de réamorçage à la valeur de la tension de phase, de sorte que le pouvoir de rupture est donné dans ces conditions par le produit: $3 I_r U_{ph, r} = \sqrt{3} I_r U_r$. L'écart entre les deux valeurs étant un facteur constant, il n'y a aucun inconvénient à désigner *par convention* comme puissance de court-circuit du réseau considéré le produit $\sqrt{3} I_r U_r$, tout en notant que généralement la tension de réamorçage atteint par pôle d'interrupteur la valeur de $1,5 U_{ph, r}$. De cette façon, on aura l'avantage de pouvoir conserver le facteur $\sqrt{3}$ pour le système triphasé, de sorte que les 3 formules $I_r U_r$ en monophasé, $2 I_r U_r$ en biphasé et $\sqrt{3} I_r U_r$ en triphasé gardent la forme usuelle des expressions donnant la puissance dans les trois systèmes de courant considérés.

De ce qui précède, il ressort que l'indication du pouvoir de rupture ne peut être suffisante que si elle est complétée par celle de la tension correspondante. Dans ces conditions, qu'il s'agisse de l'indication du courant et de la tension de rupture, ou bien de celle du pouvoir et de la tension de rupture, il suffira d'une simple opération de règle à calcul pour déduire dans les deux cas le troisième facteur.

Les deux manières de spécifier la capacité de l'interrupteur sont à ce point de vue tout à fait équivalentes, de sorte que la question de savoir s'il convient d'exprimer le pouvoir de rupture en kVA ou en ampères et volts ne présente pas d'importance pratique (voir annexe).

d) Travail de rupture.

La majorité des participants est d'avis de ne pas expliciter le travail de rupture. Les considérations qui conduisent à cette conclusion se trouvent implicitement comprises dans ce qui a été développé plus haut.

A n n e x e.

Si la notion du pouvoir de rupture s'est introduite dans la pratique, c'est peut-être parce que le calcul approché de la puissance de court-circuit triphasé se simplifie sensiblement quand il s'agit de cas fréquents dans les exploitations dont nous donnons ci-après quelques exemples.

Supposons qu'il s'agisse du choix des interrupteurs à placer sur le circuit secondaire de transformateurs-abaisseurs branchés sur un grand réseau ramifié. On peut négliger dans ce cas en première approximation l'impédance du réseau et appliquer pour la puissance P de court-circuit la formule:

$$P = \left(\frac{100}{\varepsilon_1} \cdot N_1 + \frac{100}{\varepsilon_2} N_2 + \dots + \frac{100}{\varepsilon_n} N_n \right) \text{ kVA} \quad (1)$$

où N_n est la puissance en kVA et ε_n la réactance de court-circuit en % des transformateurs connectés en parallèle.

Il en est de même pour les interrupteurs des départs d'une centrale importante, protégés par des bobines de réactance; la puissance de court-circuit est donnée par:

$$P = \frac{100}{\varepsilon} \cdot N \text{ kVA} \quad (2)$$

N désignant la puissance transmise par la bobine en kVA et ε sa réactance en % de cette puissance.

La dernière formule peut être employée pour le choix des interrupteurs des alternateurs d'une usine génératrice comportant un grand nombre de groupes branchés sur un même système de barres, protégés chacun par une bobine de réactance prévue pour la puissance du groupe et insérée entre les barres collectrices et l'interrupteur.

Si un abonné est connecté à un réseau très puissant à très haute tension au moyen d'un transformateur de puissance nominale N_1 (réactance de court-circuit ε_1 %), d'un feeder de tension intermédiaire et de réactance ε_f en % rapporté à N_1 , et enfin d'un second transformateur abaisseur de puissance N_2 et de réactance ε_2 %, on peut calculer la puissance de court-circuit chez l'abonné en appliquant la formule:

$$P = \frac{100 \cdot N_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_f + \varepsilon_2 \cdot \frac{N_1}{N_2}} \text{ kVA} \quad (3)$$

sans s'occuper ni de la tension au départ, ni de celle de la ligne, ni de la tension d'arrivée non plus.

Ces formules s'appliquent évidemment aussi aux calculs de courants de court-circuit, si l'on substitue le courant nominal I_n à la puissance nominale N . Il faut tenir compte pour l'évaluation de I_n du rapport de transformation, c.a.d. de la tension considérée. Ce calcul rapide rendra des services quand il ne s'agit que d'élaborer approximativement un avant-projet prévu pour le transport d'une puissance déterminée.

QUESTION 2.

Nombre de fermetures et d'ouvertures successives sur court-circuit.

Nous suivrons l'usage américain en désignant les opérations consécutives par des lettres, dont chacune indique la position de l'interrupteur. Ainsi la lettre:

O = open == ouvert, exprime que l'interrupteur est ouvert, la lettre

C = closed = (en circuit) qu'il est enclenché; la combinaison

OCO signifie par exemple l'enclenchement sur court-circuit, suivi immédiatement d'un déclenchement.

Le résultat du dépouillement est consigné dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.

| No. | Nombre d'opérations | Op- tants | Exploi- tants | Cons- truc- teurs | Re- cher- ches | P a y s | | |
|-------|---|--------------|------------------|-------------------------|----------------------|---------|--------|-------------------------------|
| | | | | | | France | Suisse | Autres pays |
| 1 | (CO) - 1' - (OCO) - 1' - (OCO) | 15 | 12 | 3 | | 6 | 8 | Espagne |
| 2 | (CO) - 2' - (OCO) - 2' - (OCO) | 3 | 3 | | | 3 | | |
| 3 | (CO) - 3' - (OCO) - 3' - (OCO) | 3 | 2 | 1 | | 1 | 2 | |
| 4 | (CO) - 3' - (OCO) - 7' - (OCO) | 1 | 1 | | | | 1 | |
| 5 | (OCO) - 10'' - (OCO) - 10'' - (OCO) | 1 | 1 | | | 1 | | |
| 6 | (OCO) - 30'' - (OCO) - 30'' - (OCO) | 2 | 2 | | | 2 | | |
| 7 | (OCO) - 1' - (OCO) - 1' - (OCO) | 1 | 1 | | | 1 | | |
| 8 | (OCO) - 2' - (OCO) - 2' - (OCO) | 1 | 1 | | | 1 | | |
| 9 | (OCO) - 3' - (OCO) - 3' - (OCO) | 3 | 3 | | | 3 | | |
| 10 | (OCO) - 2 ÷ 5' - (OCO) - 2 ÷ 5' - (OCO) | 1 | | | 1 | 1 | | |
| 11 | (OCO) - (OCO) - (OCO) - (OCO) | 1 | | 1 | | 1 | | |
| 12 | CO - 2' - (OCO) - 2' - (OCO) - 2' - (OCO) | 1 | | | 1 | | | Roum. |
| 13 | 6 à 10 × (OCO) à 30'' | 1 | 1 | | | 1 | | |
| 14 | CO | 2 | 1 | | 1 | 2 | | |
| 15 | (OCO) - 2' - (OCO) | 7 | | 4 | 3 | 1 | 1 | Am. G. B. Danem. Russie |
| Total | | 43 | 28 | 9 | 6 | 24 | 12 | 6 |

Sur un total de 51 réponses, 43 expriment leur avis sur le nombre de fermetures et d'ouvertures successives sur court-circuit:

28, soit 65 % proviennent d'exploitants,

9, „ 21 % „ de constructeurs,

6, „ 14 % „ de personnes attachées à des services de recherches.

Il est intéressant de noter que le cycle comportant une rupture suivie de deux fermetures-ouvertures à intervalle d'une minute, trouve le plus de partisans parmi les exploitants. Par contre, le cycle correspondant aux règles américaines et comportant deux fermetures-ouvertures à intervalle de deux minutes n'a aucun partisan parmi les exploitants qui ont répondu au questionnaire.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 2.

Les avis sont partagés quant au nombre de ruptures successives et à l'intervalle de temps à prévoir entre ces ouvertures: les uns, moins confiants en la technique moderne des interrupteurs, se contentent d'un appareil qui est en état de rompre un seul court-circuit; les autres, en se basant probablement sur des conditions de service moins favorables, demandent jusqu'à 4, voire même 6 à 10 ruptures consécutives, à des intervalles de temps de 30'' seulement. Sur un point pourtant tout le monde paraît d'accord, c'est qu'il n'y a pas lieu de faire une différence entre les interrupteurs à très haute tension et ceux à très grande intensité.

Comme il est logique d'admettre que ce sont les réponses des exploitants à la question 2 de l'enquête qui doivent être prises avant tout en considération, et que le plus grand nombre de ceux-ci sont partisans du cycle (CO) 1' (OCO) 1'

(OCO), il est tout indiqué de proposer cette épreuve comme celle à faire subir à l'interrupteur et à laquelle il devra résister sans qu'il soit nécessaire de procéder à une revision.

QUESTION 3.

Les résistances de choc.

Les *résistances de protection* (appelées aussi *résistances de choc*) ont pour but, d'une part, la réduction à des valeurs non dangereuses des surtensions qui se produisent par la disjonction des transformateurs et des lignes à vide, d'autre part, la limitation des à-coups de courant au moment de l'enclenchement des transformateurs ou des moteurs asynchrones.

Les résistances en question ne doivent pas être confondues avec les *résistances d'extinction* (à faible valeur ohmique) qui influencent le travail de rupture. A cause de leur petite valeur ohmique, les résistances d'extinction n'influent que peu sur les surtensions et doivent être considérées, d'après leur effet, comme partie intégrante de l'interrupteur.

Cette question 3 a donné lieu à 45 réponses, dont 30 d'exploitants qui sont naturellement les plus intéressantes :

- 21 réponses (70 %) proviennent d'entreprises ayant utilisé des interrupteurs avec résistances de choc et qui ont été satisfaites des résultats obtenus. D'un autre côté :
- 2 exploitants seulement font part d'expériences malheureuses avec des résistances de choc dans les interrupteurs de gros moteurs asynchrones, de transformateurs et de câbles ; ils en déconseillent franchement l'emploi.
- 7 autres exploitants n'ont pas employé d'interrupteurs avec résistances de choc et n'émettent pas d'avis à ce sujet.

Parmi les 21 exploitants qui emploient des résistances de choc, la majorité, c. à d. 13 d'entre eux (62 %) les utilisent seulement pour l'enclenchement des transformateurs, 6 (29 %) pour celui des transformateurs et des lignes, et 2 (9 %) uniquement pour l'enclenchement des lignes. L'un d'eux les employait autrefois également pour les transformateurs, mais y a renoncé par suite des perturbations dues à la nature des résistances, constituées par un matériel peu approprié (bâtons de silite). Un autre exploitant, par contre, n'emploie plus aujourd'hui de résistances de choc que pour les transformateurs, ayant fait l'expérience que ces résistances, placées dans les interrupteurs de lignes, étaient détériorées par les disjonctions violentes. Dans sa réponse, il insiste sur le fait que les résistances qu'il utilise encore pour les transformateurs sont mises hors-circuit après l'enclenchement et n'interviennent pas pour la disjonction.

Un exploitant possède des interrupteurs avec résistances de choc en service depuis 15 ans environ. Il paraît en être satisfait, mais n'a pas constaté de différence dans les résultats obtenus, soit avec ces interrupteurs, soit avec d'autres non munis de résistances.

A deux reprises on paraît avoir confondu quelque peu l'effet des coupures multiples avec celui des résistances de choc.

Parmi les 8 constructeurs d'appareillage électrique qui ont répondu au questionnaire, 5 déconseillent franchement l'emploi des résistances des choc parce qu'elles compliquent la construction des interrupteurs et peuvent causer de graves accidents, et les 3 autres restent neutres.

Il est intéressant de noter qu'aucun constructeur n'a pris parti pour les résistances.

Le dernier groupe de 7 réponses, émanant d'ingénieurs chargés de services de recherches, comprend :

- 3 avis déconseillant nettement l'emploi des résistances,
- 1 avis ne mentionnant que des expériences favorables avec des interrupteurs de ligne et de transformateurs munis de résistances de choc,

- 1 avis qui, tout en estimant que l'on peut s'en dispenser, reconnaît que l'on possède aujourd'hui pour les résistances de choc des constructions satisfaisantes,
- 2 ingénieurs ne se prononcent pas parce qu'ils n'ont pas employé de résistances jusqu'ici.

Avant de tirer une conclusion, il y a lieu d'ajouter que deux sociétés d'exploitation, qui avaient utilisé des résistances de choc, les ont enlevées complètement et qu'une société ne les emploie plus que pour les lignes à très haute tension. D'autre part, il est intéressant de constater qu'aucune des réponses présentées ne fait allusion au cas où des exploitants qui, à l'origine, n'avaient pas de résistances de choc dans leurs interrupteurs, auraient été obligés d'en placer plus tard.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 3.

La seule conclusion permise semble donc être la suivante: Au lieu d'utiliser des résistances de choc, il est préférable de renforcer les enroulements des transformateurs, etc., de manière que les à-coups de courant d'enclenchement, et notamment les surtensions à la disjonction, ne puissent pas les endommager.

QUESTION 4.

Temporisation des relais.

On sait que les différents systèmes de protection sélective des réseaux contre les effets de courts-circuits ou d'autres phénomènes anormaux se révélant en cours d'exploitation emploient des relais automatiques, fonctionnant suivant des principes très variés. On peut classer ces appareils en six groupes principaux:

- 1^o relais sélectifs à maximum et à temps-limite constant,
- 2^o relais sélectifs à maximum et à temps-limite inverse,
- 3^o relais basés sur le déséquilibre (des courants, des tensions ou des puissances),
- 4^o relais d'impédance ou de distance (basés ou non sur le déséquilibre),
- 5^o relais de chute de tension,
- 6^o relais différentiels, avec ou sans fils-pilotes.

Les relais appartenant aux groupes 1 à 5 doivent très souvent être combinés avec des relais wattmétriques à retour de puissance, si la caractéristique inhérente à ces derniers ne peut pas être obtenue par d'autres moyens.

Une protection est sélective si toute perturbation sur un tronçon de ligne, menaçant la continuité de service du réseau et la sécurité d'exploitation, est suivie aussi rapidement que possible d'une mise hors service du tronçon endommagé. A cet effet, les deux interrupteurs¹⁰⁾ encadrant ce dernier doivent être déclenchés avant tous les autres insérés en cascade dans le même circuit. Pour atteindre ce but, on doit généralement disposer les relais de telle façon que, quelle que soit la position de la partie défectueuse, le déclenchement de tous les interrupteurs se produise avec des *retards croissant par échelons à mesure qu'on s'éloigne du lieu de la perturbation* et qu'on se rapproche des points d'alimentation. Dans le cas le plus général d'un réseau bouclé à mailles serrées, la position des points d'alimentation peut varier d'un moment à l'autre suivant les disponibilités des centrales interconnectées.

Sans entrer ici dans les détails de la question, il est utile de rappeler cependant qu'au moyen des relais des trois premiers groupes combinés avec des relais wattmétriques, on peut résoudre sans ambiguïté le problème de la protection sélective des réseaux ouverts avec lignes simples et doubles, des réseaux bouclés avec un point d'alimentation, ainsi que des lignes simples de liaison entre deux centrales.

Pour tout problème sortant de ce cadre et se présentant le plus souvent dans les grandes installations modernes, il faut avoir recours aux relais des groupes

¹⁰⁾ Dans le cas d'un réseau ouvert sans ligne double et ayant un seul point d'alimentation, un seul interrupteur, le plus proche de l'endroit endommagé, devra être déclenché.

4 à 6 qui répondent à un plus grand nombre d'exigences. Il a été mentionné déjà que, dans le cas d'une perturbation, il est désirable d'éliminer la ligne défectueuse aussi vite que possible afin de limiter les dégâts causés par l'arc ou bien dus à une chute de tension incompatible avec la stabilité du réseau.

Les valeurs des retards donnés aux relais différés peuvent toutefois être déterminées en partant d'un autre point de vue.

Par l'emploi de ces relais, il est possible en effet de réduire dans une large mesure la puissance et le travail de rupture des interrupteurs, puisque le facteur d'amortissement qui régit l'allure du courant et de la tension induite au moment d'un court-circuit intervient au carré dans l'expression de la puissance. A l'avantage économique de la diminution de la capacité de rupture des interrupteurs, il y a lieu cependant d'opposer la réduction de la sécurité de service et le danger que présente alors toute coupure prématurée.

Les 47 réponses à cette question 4 peuvent être classées d'après les points de vue suivants:

- a) temporisation des relais en vue de diminuer le travail de rupture des interrupteurs;
- b) temporisation des relais dans le seul but d'obtenir une protection sélective.

*a) Temporisation des relais en vue de diminuer
le travail de rupture des interrupteurs.*

- 6 réponses (13%) sont favorables à l'emploi des relais temporisés pour obtenir une réduction du travail de rupture des interrupteurs. Ces réponses se groupent comme suit (voir les colonnes désignées par *a* dans le tableau V).

Tableau V.

| | Angleterre | | | Danemark | | | Espagne | | | Etats-Unis | | | France | | | Russie | | | Roumanie | | | Suisse | | |
|-------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>a</i> | <i>b</i> |
| Exploitants . . . | | | | | | | 1 | — | 1 | | | | 20 | 1 | 19 | | | | | | | 10 | 2 | 8 |
| Constructeurs . . | | | | | | | | | | 1 | — | 1 | 4 | 1 | 3 | | | | | | | 3 | 1 | 2 |
| Recherches . . . | 2 | — | 2 | 1 | 1 | — | | | | | | | 2 | — | 2 | 1 | — | 1 | 1 | — | 1 | 1 | — | 1 |
| Total | 2 | — | 2 | 1 | 1 | — | 1 | — | 1 | 1 | — | 1 | 26 | 2 | 24 | 1 | — | 1 | 1 | — | 1 | 14 | 3 | 11 |

t = nombre total des réponses,
a = réponses favorables à la temporisation en vue de diminuer le travail de rupture des interrupteurs,
b = réponses favorables à la temporisation pour la protection sélective.

Parmi ces 6 réponses, un constructeur et un exploitant conseillent tous deux de prévoir une temporisation des relais, mais en choisissant quand même les interrupteurs pour la puissance initiale de rupture. Un constructeur compte obtenir en même temps la protection des interrupteurs et la sélection. Les 3 dernières réponses (6 %) estiment que la temporisation des relais ne doit tendre qu'à la réduction du travail de rupture des interrupteurs.

Les temporisations minima préconisées sont de l'ordre de grandeur de 1, 2 jusqu'à 3 secondes.

b) Temporisation des relais pour la protection sélective du réseau.

- 41 réponses (87 %) émettent l'avis que la temporisation des relais doit viser avant tout à la protection sélective du réseau. Les chiffres figurant dans les colonnes *b* du tableau V montrent la répartition de ces réponses.

Il est remarquable que, sur les 41 réponses reçues, 16 (39 %) émettent l'avis que la disjonction doit être rapide, si possible instantanée. Il est intéressant de noter que toutes les réponses provenant d'Amérique, d'Angleterre, d'Espagne et de Russie proposent des temporisations très courtes, et que la moitié des exploitants français partagent cette opinion.

Les réponses se répartissent comme suit, selon les deux points de vue rappelés ci-dessus et les 3 catégories de participants à l'enquête (exploitants, constructeurs, services de recherches):

Temporisation des relais selon les points de vue:

| | <i>a</i> | <i>b</i> |
|--|------------|-------------|
| sur un total de 31 exploitants | 3 : 9,5 % | 28 : 90,5 % |
| 8 constructeurs | 2 : 25 % | 6 : 75 % |
| 8 services de recherches | 1 : 12,5 % | 7 : 87,5 % |
| 47 | 6 | 41 |

Il résulte en particulier de l'enquête que les exploitants des réseaux étendus et de fortes puissances sont tous, à une seule exception près, partisans de la temporisation en vue de la protection sélective.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 4.

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, 6 participants seulement à l'enquête estiment que la temporisation des relais doit avoir pour but la réduction du travail de rupture des interrupteurs; 2 d'entre eux font toutefois remarquer qu'un danger subsiste: c'est le cas, par exemple, lorsqu'un arc causé par des surtensions s'amorce entre phases en aval de l'interrupteur, au moment de l'ouverture de ce dernier. L'interrupteur, dont les contacts se sont déjà séparés, doit alors couper le courant de court-circuit initial. C'est pour cette raison qu'il y a lieu de tenir compte du courant initial pour dimensionner les interrupteurs.

Quelques exploitants tiennent compte du retard propre à l'interrupteur, c. à d. de celui dû au fonctionnement des bobines de déclenchement et du mécanisme, pour l'évaluation de la puissance de rupture des interrupteurs. Comme nous l'avons vu plus haut, l'interrupteur peut être exposé dans certains cas à couper la puissance initiale. D'autre part, l'amortissement du courant de court-circuit est très différent suivant les types d'alternateurs (machines à grand ou à petit nombre de tours). La réduction de la valeur initiale et l'amortissement dus aux impédances du réseau peuvent être différents selon l'emplacement de l'interrupteur dans ce réseau.

Si, dans la détermination de la capacité de rupture, on désire réduire la puissance initiale de court-circuit dans une certaine mesure en tenant compte du retard propre des interrupteurs, il faudra choisir le facteur de réduction selon les caractéristiques du réseau à l'endroit considéré.

La protection sélective moderne exige, comme on l'a dit plus haut, une disjonction de la ligne défectueuse aussi rapide que possible, voire même instantanée. Si cette condition doit être remplie, il faut tenir compte de l'augmentation de la contrainte des interrupteurs qui en résulte. Cette tendance se trouve donc être en opposition avec le principe exposé ci-dessus.

Dans les réseaux dont la puissance de court-circuit est relativement faible, on n'aura généralement pas de difficulté à trouver des disjoncteurs correspondant aux conditions imposées. Il en sera sans doute de même dans les réseaux munis de bobines de réactance, car au moyen de ces dernières il est possible de limiter la contrainte des interrupteurs.

Les dispositifs servant à la réduction de l'excitation des alternateurs (régulateurs limiteurs de courant) ne peuvent pas influencer la valeur de la puissance initiale de court-circuit; leur emploi permet cependant de diminuer la contrainte des interrupteurs, si ceux-ci sont déclenchés avec un retard suffisant.

La question de la protection sélective est particulièrement importante pour les réseaux ramifiés à alimentation multiple.

L'interconnexion des centrales et des réseaux qui tend à se généraliser, augmente considérablement la puissance de court-circuit aux différents points des réseaux. D'autre part, la protection par relais à maximum et temps-limite constant a dû faire place à une protection réalisant une sélection plus générale et plus effective. Ce

besoin s'est fait sentir puisque les relais à maximum, comme on l'a vu plus haut, ne permettent de réaliser tout au plus que la protection sélective des réseaux bouclés alimentés en un seul point. On obtient dans ces cas et avec ces relais la sélection en échelonnant le temps de déclenchement en sens inverse de l'éloignement du point d'alimentation et en donnant aux relais d'un poste de couplage quelconque des retards fixes et parfaitement déterminés, quel que soit l'endroit de la perturbation.

Généralement, les interrupteurs des postes les plus proches des points d'alimentation, c'est-à-dire ceux qui sont exposés aux contraintes les plus élevées, ont aussi les retards de déclenchement les plus grands, de sorte que la puissance de court-circuit au moment de la rupture est déjà fortement amortie.

La protection sélective moderne présente par contre des caractéristiques toutes différentes. La temporisation des relais se fait automatiquement, en fonction de l'endroit de la perturbation, et de telle façon que les interrupteurs encadrant le tronçon avarié déclenchent rapidement. Par conséquent, les interrupteurs situés près des points d'alimentation peuvent également déclencher avec un retard très réduit et avoir à couper une puissance de court-circuit voisine de la valeur initiale.

La littérature technique nous apprend que cette tendance se manifeste surtout aux Etats-Unis, où les exploitants s'efforcent de couper les courts-circuits aussi rapidement que possible pour éviter le décrochage des machines ou de centrales entières, pour raccourcir la période de chute de tension et de fréquence, pour réduire enfin les effets destructifs des arcs et les effets thermiques des courants de court-circuit dans les enroulements, câbles et appareils. La question de la continuité et de la stabilité du service assuré par plusieurs centrales représente à elle seule tout un problème.

Le temps t , s'écoulant depuis le moment de l'établissement d'un court-circuit jusqu'à son interruption, se compose en général de plusieurs parties et peut s'exprimer par la formule :

$$t = (t_0 + t_1 + t_2) + (t_3 + t_4)$$

où

- t_0 = retard propre au relais,
- t_1 = temps additionnel fixe du relais, indépendant de l'endroit du court-circuit,
- t_2 = temps d'échelonnement ou de gradation,
- $(t_0 + t_1 + t_2)$ = retard au déclenchement causé *par le relais*,
- t_3 = retard propre à l'interrupteur,
- t_4 = durée de l'arc dans l'interrupteur,
- $(t_3 + t_4)$ = retard au déclenchement dû à *l'interrupteur même*.

Le temps additionnel t_1 est le retard minimum que l'on fixe sur certains relais pour éviter un déclenchement instantané des courts-circuits rapprochés. D'une part, on a intérêt à le réduire le plus possible, d'autre part, en procédant ainsi, on augmente naturellement la contrainte des interrupteurs.

Le temps t_2 d'échelonnement ne peut pas être réduit au-delà de certaines limites, imposées par la dispersion des relais mêmes, par les erreurs dues aux inexactitudes ou fautes des rapports de transformation des transformateurs de mesure, etc. Si par exemple le temps d'échelonnement des relais d'une même ligne, appartenant à deux postes consécutifs en cascade, est trop petit et si, en outre, cet échelonnement est une fonction de la distance entre ces deux stations, distance qui peut être très faible, le retard propre aux interrupteurs pourrait causer des déclenchements intempestifs.

Pour augmenter la sélectivité du système de protection, on cherchera donc à réduire le retard propre t_3 des interrupteurs et tout spécialement de ceux à très haute tension, ce qui peut être obtenu dans une certaine mesure par une construction appropriée. Il en est de même de la durée de l'arc t_4 , dont l'importance au point de vue de la protection sélective est toutefois d'ordre secondaire.

Le problème de la protection sélective des réseaux bouclés est déjà suffisamment complexe pour qu'on n'ait pas intérêt à le compliquer en faisant intervenir encore celui de la réduction du travail de rupture des interrupteurs.

Les *CONCLUSIONS* qui précèdent peuvent *se RÉSUMER* dans les deux formules suivantes:

- 1⁰ La temporisation des relais est avant tout une question de protection sélective des réseaux; elle ne devrait donc pas être prévue dans le but de réduire la contrainte des interrupteurs.
- 2⁰ Pour faciliter la protection sélective des réseaux, il faut en premier lieu réduire le plus possible le retard des relais et surtout le retard propre des interrupteurs.

QUESTION 5.

Influence du point neutre, isolé ou non, sur la tenue de l'interrupteur.

Il était à prévoir que le nombre des réponses concluantes à cette question serait faible, car peu nombreux sont aussi les exploitants qui ont eu la possibilité de comparer un même réseau dans des conditions différentes, quant au point neutre.

Sur les 51 dossiers de réponses:

- 40 ne s'expriment pas sur cette question.
- 5 exploitants, par contre, concluent nettement que la mise du neutre à la terre n'a aucune influence sur la tenue des interrupteurs; 2 d'entre eux ont pu comparer leur réseau pendant une période d'exploitation avec neutre isolé et une autre avec le neutre à la terre au moyen d'une inductance; 2 autres exploitants ont fait la comparaison entre leur réseau isolé, puis celui-ci ayant son neutre à la terre au moyen d'une faible résistance; le 5^{ème} exploitant fait une comparaison analogue, mais le neutre étant à la terre au moyen d'une forte résistance.
- 5 réponses, dont 4 proviennent de constructeurs et 1 d'un service de recherches, estiment que l'on ne peut attendre un allègement du travail de coupure d'un interrupteur du fait que le neutre du réseau est à la terre.
- 1 exploitant d'un réseau avec neutre à la terre par l'intermédiaire d'une forte résistance limitant le courant de terre, a constaté que les déclenchements commandés par un relai dans le circuit du neutre étaient beaucoup moins violents que les déclenchements commandés par relais à maxima, ce qui est en soi bien compréhensible.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 5.

Si l'on tient compte, d'une part, qu'aucune réponse n'exprime que le point neutre à la terre ait une influence nuisible sur la tenue des interrupteurs et que, d'autre part, 5 exploitants ont constaté, par comparaison pratique, qu'il n'y avait aucune différence dans la tenue des interrupteurs si le point neutre est isolé ou mis à la terre, soit directement, soit au moyen d'une résistance ou d'une inductance, il semble bien que l'état du neutre d'un réseau, isolé ou non, n'ait pas d'influence sur la tenue des interrupteurs.

QUESTION 6.

Des matériaux isolants pour la construction des interrupteurs.

Sur les 51 dossiers reçus, 32 s'expriment sur cette question d'ordre très secondaire. La statistique de ces réponses ne permet pas de tirer des conclusions précises sur la valeur comparée de la porcelaine, du bois ou de la bakélite comme isolant, car la plupart des réponses, pronant tel ou tel matériel isolant, n'indiquent

pas pour quel type d'interrupteur ce matériel a été employé. Aussi une comparaison des différents isolants dans des conditions similaires n'est-elle pas possible.

L'analyse des réponses reçues, classées par catégories de matériel, peut se résumer comme suit:

La porcelaine. — Cet isolant conserve encore beaucoup de partisans, mais seulement parmi ceux qui l'emploient pour des constructions d'interrupteurs de faibles masses mobiles et pour moyenne tension.

La porcelaine semble par contre être complètement abandonnée pour la construction des gros interrupteurs à très haute tension, à cause de son poids, de sa fragilité et des aléas que présentent les scellements.

Un avantage certain de la porcelaine est qu'elle présente beaucoup moins de prise aux arcs par cheminement que le bois ou la bakélite.

Le bois. — Cet isolant, dont l'emploi est plus récent que celui de la bakélite dans la construction des interrupteurs, est considéré par de grandes maisons de construction comme la matière la plus propice, à condition que le bois soit séché et imprégné de façon judicieuse. Les constructeurs employant le bois comme isolant paraissent posséder chacun un système d'imprégnation qui lui est propre.

Certains constructeurs et quelques exploitants craignent l'emploi du bois parce que, mal imprégné, il serait hygroscopique et tendrait à se fendre ou à se tordre. Les exploitants ayant fait de telles expériences reconnaissent qu'il ne s'agissait pas de très récentes constructions.

La bakélite ou produits similaires. — L'emploi de ces matières isolantes a pris un développement considérable. Il permet des équipements mobiles légers et facilite ainsi la construction des interrupteurs de grandes masses. La bakélite est toutefois très critiquée. Un grand nombre de réponses signalent son défaut principal qui est l'inconstance de la qualité d'une livraison à l'autre, d'où la nécessité d'un contrôle très sévère du matériel avant son emploi.

Les auteurs de 4 réponses recommandent, d'après des expériences faites personnellement, de ne pas employer de pièces isolantes placées horizontalement, par suite du danger qu'offrent les dépôts de particules carbonisées (de l'huile) et de l'eau provenant de la décomposition de l'huile. Ces dépôts peuvent rendre la surface horizontale suffisamment conductrice pour provoquer les perturbations les plus graves.

CONCLUSIONS CONCERNANT LA QUESTION 6.

On en est en droit d'admettre que tous les matériaux isolants usuels peuvent être employés, chacun dans la limite de ses propriétés spéciales.

Quelques suggestions inspirées par les résultats de l'enquête.

En résumant les conclusions tirées des différentes parties de l'enquête, les rapporteurs ont formulé quelques suggestions et définitions, espérant qu'une discussion générale, à Paris, permettrait de compléter et de modifier cette première ébauche, de manière à apporter une contribution utile à la solution du problème du choix des interrupteurs dans l'huile, en vue de provoquer une entente internationale sur les plus importantes des questions traitées.

§ 1, ad. 1 a. *Tension de rupture ou de réamorçage.*

La tension de rupture est définie par la valeur efficace de la tension qui se rétablit en amont du disjoncteur immédiatement après la rupture des arcs sur toutes les phases.

Remarque 1: Tout interrupteur doit pouvoir supporter une tension de rupture égale à sa tension nominale.

Remarque 2: En général, lors de déclenchements différés, la tension de rupture est sensiblement inférieure à la tension de service; aux déclenchements

instantanés, la différence entre ces deux tensions est moins grande, sans toutefois être négligeable. Lorsqu'une coupure instantanée dans un circuit à réactance élevée entraîne la suppression de la charge ou d'une partie importante de cette charge, la tension de rupture peut théoriquement atteindre des valeurs supérieures à la tension de service. On ne tiendra pas compte des surtensions instantanées.

Remarque 3: Une élévation de la tension de rupture au-delà de la valeur calculée peut se produire lors d'une fausse manœuvre, au moment d'une mise en parallèle de deux réseaux. Dans le cas le plus défavorable, où deux sources d'énergie de même puissance sont enclenchées en opposition de phase, le courant qui prend naissance a la même valeur que lors du court-circuit sur l'une des parties seulement; la tension de rupture, et par conséquent aussi la puissance de rupture aux bornes de l'interrupteur qui déclenche en premier lieu, atteignent cependant la valeur double.

Remarque 4: Pour déterminer la tension de rupture en partant de l'oscillogramme d'une coupure, on tracera les courbes-enveloppes de la sinusoïde de la tension après la coupure et on calculera la valeur efficace de la première demi-période, soit à l'aide d'un étalonnage, soit en la comparant à la tension avant le court-circuit.

Remarque 5: Pour calculer la tension de rupture sous laquelle un interrupteur a dû couper lors d'une perturbation, on se servira des courbes dont on fait usage pour déterminer l'amortissement du courant alternatif de court-circuit¹¹⁾. Le temps durant lequel le déclenchement a été différé peut être posé égal à celui pour lequel sont réglés les relais, à condition toutefois que le fonctionnement correct de ces derniers soit certain. Lors des déclenchements instantanés (par relais à tension nulle par exemple) on peut admettre que pour les interrupteurs d'une tension de service inférieure à 15 kV, la coupure se fait en 0,1 à 0,2 s; pour les tensions supérieures à 15 kV, la durée totale de court-circuit peut être considérée comme étant comprise entre 0,2 et 0,5 s.

§ 2, ad. 1 b. *Courant de rupture.*

Le courant de rupture est défini par la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit traversant l'interrupteur, lors d'un déclenchement, au moment de la séparation des contacts.

Remarque 1: Le courant de rupture à considérer plus spécialement est celui qui correspond à la tension de rupture égale à la tension de service. Ce n'est qu'exceptionnellement, et dans des cas nettement délimités, que l'exploitant pourra être conduit à envisager l'intensité du courant de rupture pour une tension de rupture inférieure à la tension de service.

Remarque 2: Par „courant initial de court-circuit“, on entend la valeur efficace de la composante alternative du courant au début du court-circuit. Le „courant permanent de court-circuit“ s'établit quand la période transitoire est complètement amortie. Pour le calcul approché de l'amortissement du courant de court-circuit, on peut utiliser les courbes déjà mentionnées plus haut.

Remarque 3: Il n'y a pas lieu de faire intervenir, dans la définition de l'intensité efficace du courant de rupture, la composante exponentielle du courant continu, dont la grandeur dépend essentiellement de l'instant (phase) de l'établissement du court-circuit. Mais il doit être bien entendu qu'un interrupteur, d'une capacité de rupture donnée, doit pouvoir fonctionner correctement, quelle que soit la phase d'établissement du court-circuit et, par suite, quelle que soit la grandeur de cette composante de courant continu entre zéro et sa valeur maximum.

Remarque 4: L'amortissement du courant pendant la rupture, c'est-à-dire pendant la durée de l'arc, peut être négligé, étant donné que, d'une part, il est diffi-

¹¹⁾ Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers 1918, t. XXXVII, p. 48.

cile de déterminer d'avance son influence sur le travail de rupture et que, d'autre part, cet amortissement dépend de la longueur et de la résistance de l'arc, essentiellement variables d'un système d'interrupteur à l'autre. Pour cette raison, le courant de rupture à prendre en considération est celui du moment de la séparation des contacts.

Remarque 5: Le courant de rupture peut être mesuré sur un oscillogramme en divisant par $2\sqrt{2}$ l'amplitude, définie par les courbes-enveloppes des sommets de la courbe de courant de court-circuit, pour l'abscisse correspondant à la séparation des contacts. L'instant de la séparation des contacts est déterminé au moyen de la tension de l'arc qui, généralement, peut être lue sur l'oscillogramme. Si cette dernière méthode présente des difficultés, ou se révèle trop peu exacte, on peut enregistrer sur le même oscillogramme, par un procédé approprié, le mouvement d'ouverture de l'interrupteur pour en déduire l'instant de l'ouverture.

Remarque 6: L'intensité de rupture est généralement plus faible que l'intensité du court-circuit initial.

Il est bien entendu que le disjoncteur doit pouvoir supporter le courant de court-circuit dès le moment de son établissement jusqu'à sa rupture, pendant un temps suffisant, sans aucune manifestation susceptible de le détériorer ou d'aggraver les conditions de la rupture devant s'opérer immédiatement après, c'est-à-dire:

- a) sans échauffement exagéré des contacts,
- b) sans effet électrodynamique susceptible de produire des déformations ou simplement une réduction nuisible de la pression de contact, tant sur les contacts principaux que sur les contacts d'extinction.

Le constructeur devra donc compléter sa garantie de la puissance de rupture par une clause relative à l'intensité du courant que l'appareil est susceptible de supporter dans ces conditions pendant 3 s.

Ces intensités devront être définies par les valeurs efficaces de la composante alternative seule, étant entendu que la garantie porte sur la résultante de la composante alternative et de la valeur maximum de la composante de courant continu.

Remarque 7: En fixant l'intensité du courant de rupture d'un interrupteur prévu pour un point donné du réseau, il est recommandable de prendre en considération les possibilités de rupture d'un courant voisin du court-circuit initial, soit par suite d'un fonctionnement anormal, soit par suite de l'intérêt que l'on pourrait avoir à supprimer tout retard de déclenchement¹²⁾. *Tout interrupteur devrait donc être choisi pour la plus grande intensité du courant de rupture qu'il pourrait avoir à couper durant son service, même si ce courant ne se produit que dans des conditions anormales. Ce courant sera le plus grand courant de court-circuit qui puisse s'établir à l'emplacement de l'interrupteur (courant de court-circuit initial).*

Remarque 8: Il est bien entendu que, pour une tension de rupture donnée, le disjoncteur doit pouvoir couper non seulement le courant de rupture maximum, mais toutes les intensités inférieures ou égales, quel que soit le $\cos \varphi$, dans les conditions de fonctionnement définies plus loin.

§ 3. ad. 2. *Nombre admissible d'ouvertures et de fermetures successives et intervalles entre ces opérations.*

Les disjoncteurs à huile doivent pouvoir couper à 3 reprises la puissance de rupture nominale garantie aux intervalles indiqués ci-après, le courant initial ne dépassant pas les limites fixées:

- 1^o Coupure;
- 1 minute d'intervalle;

¹²⁾ Il appartient à l'exploitant de tenir compte également le plus largement possible des prévisions d'accroissement des puissances en jeu.

2^o Enclenchement sur le court-circuit, suivi immédiatement de la disjonction; 1 minute d'intervalle;

3^o Répétition de l'opération 2.

L'appareil ne devra pas exiger de revision au cours de ces manœuvres, après lesquelles il devra pouvoir être employé encore en service normal et fonctionner correctement au point de vue mécanique.

Une revision comportant, s'il y a lieu, le remplacement de l'huile et des contacts sera effectuée après chaque cycle complet.

Remarque 1: Ce cycle, considéré comme épreuve de l'appareil ne réalise en général l'essai du disjoncteur que sur les tension et courant de rupture, et non sur le courant initial de court-circuit.

Il y aurait donc lieu de prévoir éventuellement des essais de fermeture sur le courant initial de court-circuit, même sous tension très réduite. Après ces essais, on doit pouvoir réemployer les contacts principaux sous courant nominal, une faible détérioration des pièces de contact étant admissible en soi après le cycle des 3 essais.

§ 4. ad. 1 c. *Capacité de rupture.*

La définition de la capacité de rupture d'un interrupteur résulte:

d'une part de la tension de rupture et de l'intensité du courant de rupture, définies respectivement aux §§ 1 et 2,

d'autre part de la garantie du nombre et de la durée des intervalles entre enclenchements et déclenchements successifs définie au § 3.

En kVA, la capacité de rupture d'un appareil monophasé, diphasé, triphasé peut être exprimée par le produit de la tension de rupture et du courant de rupture, multiplié respectivement par le facteur correspondant au système de courant, d'après les formules:

$$I_r U_r, 2 I_r U_r \text{ et } \sqrt{3} I_r U_r.$$

Remarque 1: Cette notion n'est introduite que pour indiquer la capacité des interrupteurs dans l'huile et se rapporte toujours à la coupure d'un circuit inductif. L'indication de la capacité de rupture à une tension donnée ne permettra généralement pas de tirer une conclusion sur la valeur de la capacité de l'interrupteur sous une autre tension; l'indication de la tension de rupture et de celle du pouvoir de rupture en kVA est de ce fait indispensable.

Remarque 2: Les chiffres à garantir pour la capacité de rupture d'un disjoncteur comporteraient une tolérance de 15 % par exemple.

Résultats de la discussion de Paris.

Le rapport du Comité Suisse a provoqué à la Conférence Internationale des Grands Réseaux une discussion nourrie dans laquelle les propositions et conclusions du Comité n'ont pour ainsi dire pas été combattues. De l'avis général, le rapport présenté est une contribution précieuse à la mise au point des connaissances actuelles sur les interrupteurs, susceptible de faciliter sensiblement les recherches futures.

M. Perrochet a formulé le vœu que la Conférence fasse siennes les suggestions du Comité Suisse et les transmette à la Commission Electrotechnique Internationale. M. Tribot-Laspière, estimant que ces résultats sont préliminaires, suggéra que le Comité continue ses travaux sous la présidence de M. Perrochet et que les résultats actuels soient transmis dans un premier rapport à la C. E. I.

L'assemblée s'étant déclarée d'accord avec les conclusions du Comité Suisse a décidé à l'unanimité que ce Comité continuera à fonctionner pour poursuivre ses études et que son rapport, ainsi que le compte-rendu sténographique des discussions, seront transmis à la Commission Electrotechnique Internationale pour servir de base à une réglementation internationale des interrupteurs dans l'huile.