

Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension

54, avenue Marceau, Paris

Session 1935 — 27 Juin-6 Juillet

350. — EXIGENCES AUXQUELLES DOIVENT SATISFAIRE LES PARAFODRES SUR LA BASE DES ÉTUDES FAITES AU COURS DE CES DERNIÈRES ANNÉES DANS LE DOMAINE DES SURTENSIONS

par le Dr C. BERGER,

Ingénieur de l'Association Suisse des Électriciens, Zurich.

1. **Résumé de l'étude des surtensions.** — On sait actuellement d'une manière certaine que d'importantes surtensions sont engendrées dans les lignes aériennes sous l'action de la foudre. Les recherches les plus récentes ont permis de constater que ces surtensions sont un peu moins fréquentes en Europe qu'aux États-Unis, ce qui tient probablement à la différence de l'importance des orages sur les deux continents. Ces surtensions d'origine atmosphérique sont souvent considérables et leurs valeurs maxima n'ont aucune relation directe avec la tension de service de l'installation électrique. Pour des raisons d'ordre économique, il est impossible de construire les lignes à moyenne et à faible tensions de façon qu'elles puissent résister aux contraintes exercées par la foudre. On est donc obligé de considérer ces perturbations comme des cas de force majeure, ou de prévoir des appareils de protection d'un prix abordable, susceptibles de réduire les surtensions à une valeur inoffensive, tout au moins pour les parties les plus importantes de l'installation (centrales, sous-stations). En général, ce n'est pas la destruction de matériel par suite des surtensions d'origine atmosphérique, mais bien la diminution des recettes d'exploitation et les désagréments résultant des interruptions de service consécutives qui fixent le rendement économique du système de protection envisagé.

2. Genre de danger provoqué par les surtensions d'origine atmosphérique dans les réseaux aériens. — On sait aujourd'hui que des tensions de nature ondulatoire de l'ordre de 100 à 200 kV (valeur de crête) peuvent être induites dans les lignes aériennes sous l'action indirecte et capacitive de la foudre (*fig. 1 et 2*). Des mesures récentes ont montré qu'un effet spécial se présente dans

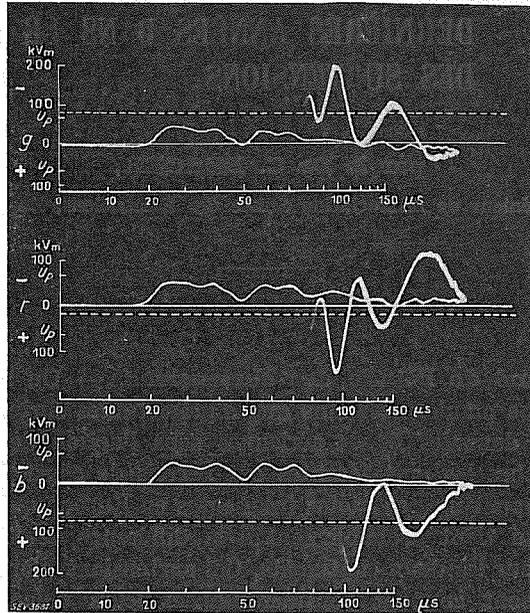


Fig. 1. — Premier exemple d'oscillogramme de la tension provoquée par un coup de foudre indirect, relevé sur les trois phases d'une ligne à 80 kV (à remarquer la quasi-identité des tensions sur les trois phases) (*Bulletin A. S. E.*, 1934).

le cas des très grandes portées, où l'écartement entre la ligne et le sol, ainsi que la flèche, ont une valeur anormale, de sorte que les tensions induites diffèrent notablement sur les trois phases (*fig. 3*). Des surtensions encore plus élevées proviennent des coups de foudre directs sur les fils de la ligne ou les pylônes. Ce cas, pratiquement le plus important, du coup de foudre direct provoque un accroissement très rapide des tensions et des courants dans la ligne foudroyée, qui se transmet dans les deux sens de la ligne sous forme d'ondes à front raide [*voir oscillogramme (fig. 4)*], du fait d'un

brusque déversement de courant provenant de la foudre. Si les lignes sont montées sur pylônes en fer, la tension contre la terre est alors généralement si élevée qu'il se produit un contournement de l'isolement de la ligne aux pylônes voisins. Par contre, si la ligne est montée sur poteaux en bois, le contournement des isola-

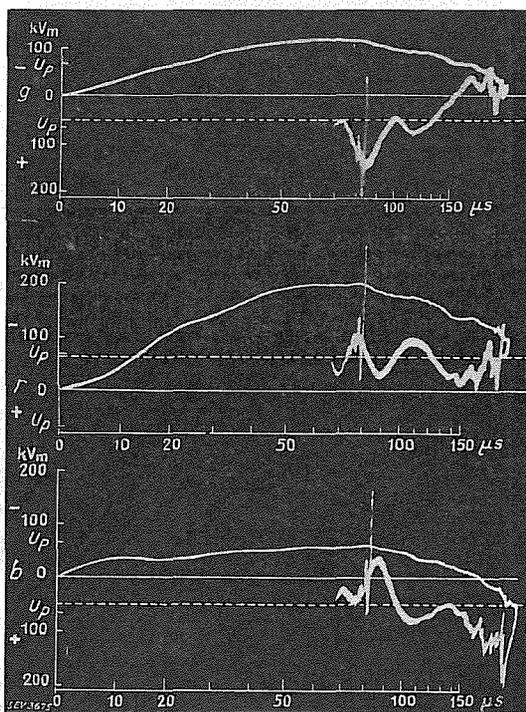


Fig. 2. — Deuxième exemple d'oscillogramme de la tension provoquée par un coup de foudre indirect, relevé sur les trois phases d'une ligne à 80 kV (*Bulletin A. S. E.*, 1934).

teurs en porcelaine ne suffit pas à provoquer une décharge à la terre, car la valeur d'isolement du bois est très élevée dans le cas des tensions de brève durée. Il en résulte des surtensions très élevées, qui peuvent entraîner des contournements d'isolateurs sur les pylônes en fer disséminés dans la ligne, même à plusieurs kilomètres de distance du point foudroyé. Si le courant provoqué par la foudre atteint une valeur telle que la tension contre la terre de la ligne foudroyée soit de quelques millions de volts, il se produit

*

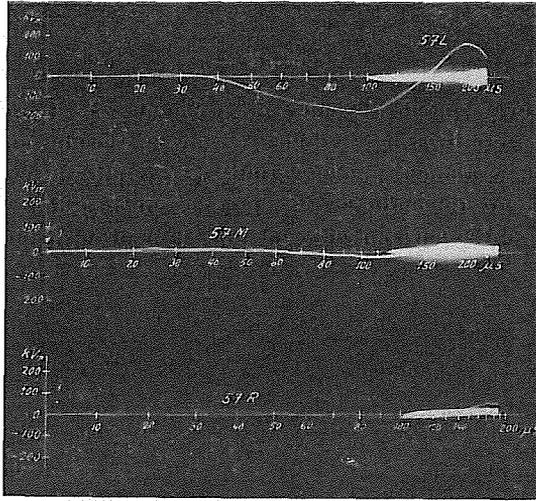


Fig. 3. — Troisième exemple d'oscillogramme de la tension provoquée par un coup de foudre indirect, relevé sur les trois phases d'une ligne à 150 kV hors service et mise à la terre à 8 km de l'oscillographe (à remarquer la grande différence des tensions sur les trois phases et l'apparition de l'onde inversée produite par le retour de l'onde réfléchie au point de mise à la terre).

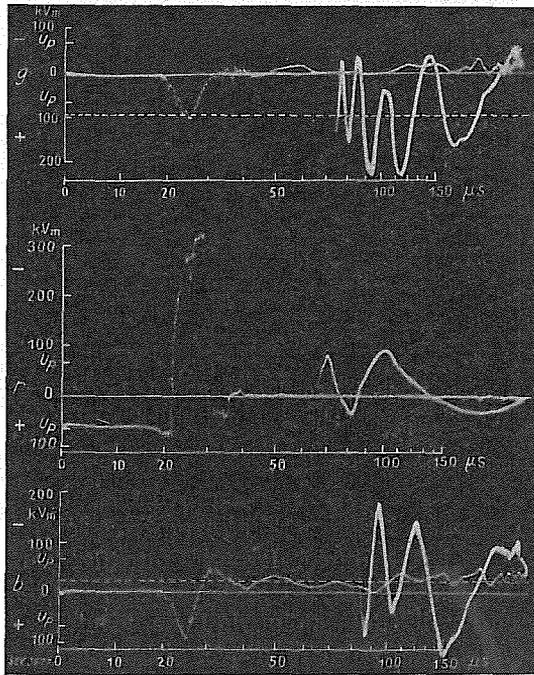


Fig. 4. — Exemple d'oscillogramme de la tension provoquée par un coup de foudre direct, relevé sur les trois phases d'une ligne à 80 kV en service (*Bulletin A. S. E.*, 1934).

un contournement d'un ou plusieurs poteaux en bois, qui sont alors

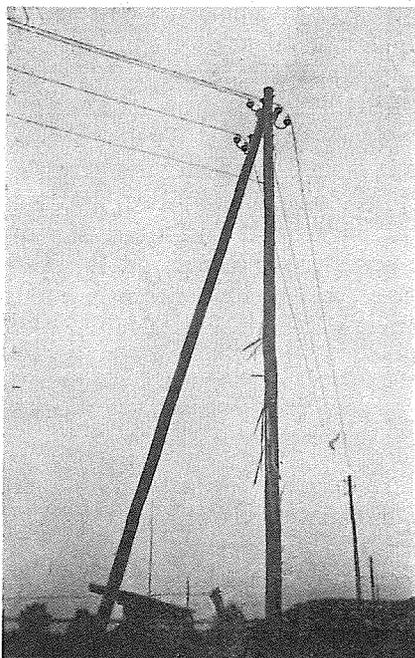


Fig. 5. — Poteau en bois foudroyé en 1933 près de Wohlen (Suisse).
Pas de dégâts aux isolateurs de ligne.

fendus ou déchiquetés par l'explosion de la couche d'air dans le canal de passage de l'arc (*fig. 5*).

3. Comment protéger les installations électriques contre les effets des coups de foudre sur les lignes ? — Dans un Rapport présenté l'année dernière au Congrès de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie électrique, l'auteur a montré quelles sont les mesures qui peuvent être prises dans les lignes pour *empêcher la formation* de ces ondes de surtension. Ces mesures sont de deux sortes : mise à terre suffisante des poteaux en corrélation avec des fils de terre correctement disposés, et suppression des avaries dues à l'amorçage d'arcs par des armatures (anneaux-cornes, etc.). Pour les lignes à moyenne et à faible haute tension, les premières mesures indiquées sont d'un prix prohibitif et la dernière n'est pas satisfaisante à cause des perturbations que peu-

vent provoquer les oiseaux. Dans ce domaine, il n'est donc pas possible aujourd'hui d'empêcher la formation des surtensions et l'on doit s'attendre à des phénomènes de ce genre dans les lignes aériennes. Pour *limiter* la valeur de ces surtensions, on peut théoriquement placer des appareils de protection sur tous ou presque tous les poteaux de la ligne; ces dispositifs ont pour but d'évacuer le *courant de foudre* vers la terre et d'éviter ainsi le contournement de l'isolement de la ligne. Pour éviter des perturbations de service, ce passage à la terre doit toutefois être bloqué automatiquement après l'écoulement du courant de foudre, afin que le courant de service ne puisse persister sur ce passage. Il se produirait sans cela une mise à la terre accidentelle, voire même un court-circuit sur la ligne si le courant s'écoulait à la terre par plusieurs phases. Le dispositif de protection doit donc fonctionner comme une *valve*. Tant que la tension de la ligne contre la terre atteint des valeurs inadmissibles pour l'isolement de la ligne, du fait du courant de foudre circulant dans le canal amorcé par la foudre, le dispositif de protection laisse écouler vers la terre autant de courant qu'il est nécessaire pour maintenir la tension de la ligne à une valeur suffisamment basse. Dès que le courant de foudre cesse de s'écouler, le passage de courant doit être interrompu aussi rapidement que possible.

Si l'on considère que l'ordre de grandeur des courants de foudre mesurés jusqu'ici est de 10^4 à 10^5 A, on voit immédiatement quelles sont les exigences auxquelles la valve doit satisfaire. Elle doit évacuer jusqu'à 10^5 A pendant la durée du courant de foudre, en maintenant une tension quelque peu inférieure à la tension de contournement de l'isolement de la ligne. Le courant de foudre ayant cessé, elle doit réduire à zéro le passage de courant à la terre, ce qui fait revenir la tension de la ligne contre terre à sa valeur normale de service, soit environ $1/3$ à $1/5$ de la tension de contournement de l'isolement de la ligne. Un appareil de ce genre, le Deion Protector de la Westinghouse El. et Man. Co, cherche à atteindre ce but. L'à-coup de courant provoqué par la foudre est guidé dans un tube isolant relativement mince, dont les dimensions et la composition ont été choisies de façon que le courant de service subséquent soit interrompu comme dans un bon tube de fusible. Le tube est précédé d'une distance disruptive qui le sépare normalement de la ligne. Le tube Deion agit comme un interrupteur rapide. Toutefois, il ne peut pas interrompre n'importe quels courants alternatifs, de sorte que ce dispositif reste limité aux lignes

dont la puissance de court-circuit est relativement faible. Dans les réseaux à grande puissance de court-circuit, où une extinction n'est pas assurée, l'action de ces appareils est équivalente à celle des armatures de protection contre les effets des arcs. Jusqu'à présent, lorsqu'il s'agit d'une mise à terre simultanée sur plusieurs phases, on ne connaît pas d'autres appareils susceptibles d'assurer l'évacuation à la terre du courant provoqué par la foudre, tout en évitant une interruption de service de la ligne. En cas de mise à terre sur une seule phase, la bobine d'extinction est à même de couper immédiatement l'arc à la terre sans qu'il se produise aucune perturbation de service.

4. Effets des ondes de surtension. — Dans bien des cas, on doit donc se borner, pour le moment, à laisser telles quelles les lignes non protégées contre les coups de foudre, à éviter autant que possible les dégâts dus aux arcs de court-circuit qui s'amorcent à la porcelaine des isolateurs par suite d'un contournement, et à empêcher que les ondes de surtension partant de la ligne foudroyée ne causent des avaries dans les installations.

Les avaries causées par ces ondes de surtension peuvent être classées en deux catégories :

1° Contournement aux endroits du réseau dont l'isolement est plus faible ou aux points de réflexion, c'est-à-dire en particulier dans les stations et aux extrémités des lignes;

2° Court-circuits entre spires dans les enroulements des génératrices et des transformateurs branchés directement sur la ligne.

Les expériences d'exploitation recueillies en Suisse, et probablement aussi à l'étranger, montrent que les perturbations de la première catégorie sont sensiblement plus importantes que celles de la deuxième.

Voici à ce sujet, à titre d'exemple, quelques données statistiques relevées dans un réseau de distribution à 8 kV ⁽¹⁾.

Dans un réseau d'une longueur totale d'environ 1 021 km (46 lignes d'une longueur moyenne de 23 km), 715 transformateurs sont en service depuis 1922 et abaissent la tension de 8 kV en tension d'utilisation. Le nombre des perturbations de service et d'avaries

⁽¹⁾ Ces données statistiques ont été obligeamment établies par les soins des Services électriques du Canton de Zurich (Suisse).

de transformateurs ressort du Tableau I. On entend par perturbation de service le déclenchement automatique d'un disjoncteur 8 kV dans l'une des sous-stations à 8 kV alimentant le réseau. Les interruptions permanentes de service sont celles durant lesquelles la ligne déclenchée n'a pas pu être remise sous tension en moins de 6 mn, probablement du fait d'une avarie permanente.

TABLEAU I.

Année.	Fonctionnement des disjoncteurs par temps d'orage.		
	Remise en service possible dans les 6 mn.	Interruptions de service de plus de 6 mn. (avaries permanentes).	Avaries de transformateurs. par temps d'orage.
Juill. 1929-Juin 1930	115	9	2 à 3 par an
1930-1931	85	7	
Oct. 1931-Sept. 1932	61	5	3 à 4 ‰ par an
1932-1933	85	2	
1933-1934	76	2	(¹)

Comme on le voit, dans ce réseau à 8 kV équipé de bons transformateurs à bain d'huile, il ne se produit que peu d'avaries de transformateurs dues aux orages; par contre, des interruptions de brève durée (fonctionnement de disjoncteurs) provoquées par des contournements dans le réseau sont notablement plus nombreuses. Avec les grands transformateurs modernes (protégés contre les ondes à front raide), la probabilité d'avaries est encore moindre; même des contournements aux bornes au cours d'orages ne provoquent généralement pas d'avaries à l'enroulement.

5. Le but d'une protection moderne contre les surtensions est donc en première ligne d'*empêcher des contournements et des dégâts dans les stations elles-mêmes*, où l'isolement est souvent plus

(¹) Ces avaries ne concernent que les *transformateurs à bain d'huile*, qui n'avaient pas encore été soumis à l'épreuve des ondes à front raide.

Les transformateurs avariés présentaient presque toujours un court-circuit entre spires. En ce qui concerne les *transformateurs dans l'air*, les expériences faites dans ce même réseau portent sur 60 transformateurs. Au cours des années 1912 à 1922, le nombre de ces transformateurs avariés était annuellement de 4 à 5, c'est-à-dire 7 à 8 ‰, soit environ 12 fois plus que dans le cas des transformateurs à bain d'huile.

faible que celui de la ligne (surtout lorsqu'il s'agit de lignes sur poteaux en bois) et où les contournements pourraient provoquer des perturbations sensibles et causer de graves avaries. Au cours de ces dernières années, toute une série de nouveaux appareils de protection contre les surtensions, ou du moins d'appareils sensiblement améliorés, ont été lancés sur le marché pour être montés dans les stations électriques. Il a donc paru nécessaire d'établir un *programme normal d'essais* basé sur les connaissances les plus récentes des surtensions et permettant d'effectuer des essais appropriés et uniformes, en vue de déterminer la valeur de protection et la sécurité de fonctionnement de ces appareils.

6. Contraintes auxquelles est soumis un parafoudre monté dans une station électrique. — La tension aux bornes du parafoudre est normalement la tension de service, qui peut être, soit la tension de phase, soit la tension composée. Au cours de l'orage, des surtensions provoquées par le foudroiement de la ligne en un point quelconque viennent se superposer à cette tension. La forme de ces surtensions est connue par l'étude des orages faite au cours de ces dernières années. Elle varie malheureusement beaucoup, car la foudre est un phénomène complexe et très variable. La surtension qui atteint le parafoudre de la station n'est généralement pas le foudre elle-même, mais une *onde électrique* dirigée le long de la ligne aérienne, qui part du point foudroyé et avance vers la station. Cette onde doit être absorbée complètement ou en partie par le parafoudre, de telle sorte que la tension à ses bornes ne dépasse jamais la valeur admissible pour l'installation à protéger. Un parafoudre efficace doit donc en premier lieu fonctionner immédiatement dès qu'une surtension l'atteint, et en outre provoquer une réduction suffisante du gradient de potentiel de l'onde, en absorbant une partie suffisante du courant transporté par l'onde mobile. Quand il s'agit d'un coup de foudre à une certaine distance, l'impédance d'onde de la ligne joue le rôle d'un limiteur de courant pour le parafoudre. Si l'on considère l'autre cas extrême, il est évident que *lorsque la foudre atteint directement le parafoudre*, celui-ci est parcouru par le courant total de la foudre. Il va de soi qu'un tel parafoudre pourrait être construit, mais il est probable qu'il coûterait beaucoup plus cher que les avaries provoquées dans la station non protégée. En outre, ce parafoudre idéal ne serait pratiquement utilisé que dans des cas extrêmement rares; car, parmi les nombreux contournements qui peuvent se produire dans

une station, seule une faible partie provient de coups de foudre sur la ligne à proximité immédiate de la station.

Dans le *domaine intermédiaire* pratiquement important, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de coups de foudre directs dans la ligne à quelques 100 ou 1000 m de la station protégée, le parafoudre est soumis à des contraintes qui vont du courant d'onde au courant de foudre. Ces courants s'établissent par échelons, du fait de l'amorçage d'oscillations entre le point foudroyé et le parafoudre, d'où résulte un courant présentant des valeurs de plus en plus élevées.

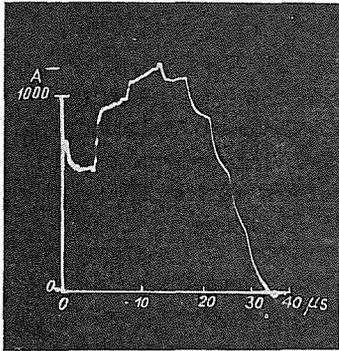


Fig. 6 a. — Établissement par échelons du courant dans un parafoudre lors de la décharge d'un générateur de chocs de $0,12 \mu\text{F}$ à 600 m du parafoudre.

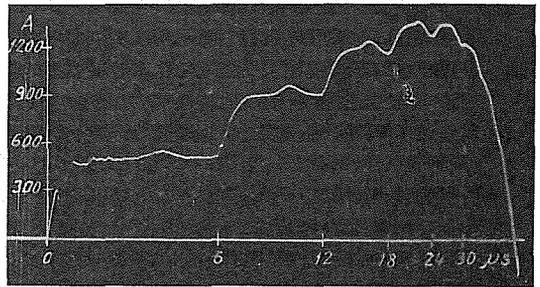


Fig. 6 b. — Établissement par échelons du courant dans un parafoudre de 20Ω , lors de la décharge d'un générateur de chocs de $0,08 \mu\text{F}$ à 900 m du parafoudre.

La figure 6 a montre l'allure du courant dans un parafoudre, lors de la décharge d'un générateur de chocs d'une capacité de $0,12 \mu\text{F}$ à 600 m de distance du parafoudre.

La figure 6 b montre l'allure correspondante du courant, lors de la décharge d'un générateur de chocs de $0,08 \mu\text{F}$ sur une ligne de 900 m de longueur et un parafoudre ayant une résistance de 20Ω . L'augmentation du courant par oscillations dépend de la distance entre le point de décharge et le parafoudre, et surtout de la durée du courant de décharge. Dans les figures 6 a et 6 b, il s'agit de deux durées moyennes.

7. Schéma de principe. — Pour reproduire aussi fidèlement que possible les conditions réelles des surtensions d'origine atmosphérique, la disposition des essais des parafoudres a été choisie

conformément au schéma de principe indiqué sur la figure 7. Le parafoudre à essayer, A, est disposé à l'extrémité d'une ligne aérienne à l'autre bout de laquelle est branché un générateur de chocs. Cette ligne peut être alimentée par un transformateur d'essai, T, sous une tension alternative correspondant à la tension de type du parafoudre à essayer. Le générateur de chocs, St, est chargé lentement, jusqu'à ce qu'il se décharge sur la ligne et le parafoudre A, par suite de l'amorçage de l'éclateur F₃. Dans cette disposition,

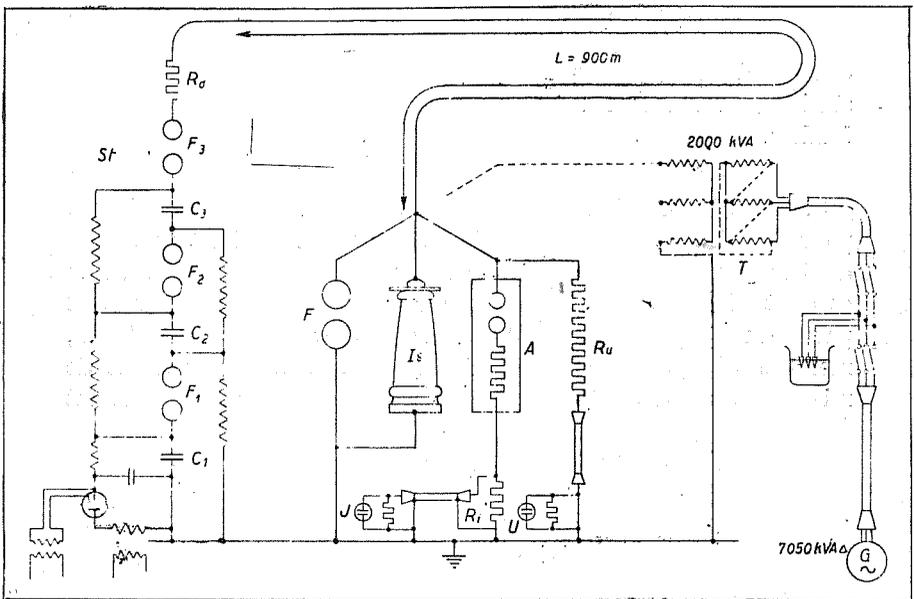


Fig. 7. — Schéma de principe de l'installation d'essai des parafoudres.

le générateur de chocs reproduit convenablement l'effet d'un coup de foudre; l'amorçage de l'éclateur F₃ correspond au foudroiement de l'endroit considéré de la ligne. Une surtension de choc de brève durée est ainsi superposée à la tension de service fournie par le transformateur T. Le parafoudre A doit limiter la surtension momentanée aux bornes du transformateur d'alimentation, de façon qu'il ne se produise ni *contournement*, ni avaries d'enroulement. Une série d'isolateurs provenant du réseau à protéger sont disposés en parallèle avec le transformateur T, respectivement avec le parafoudre A. On peut aussi prendre des relevés oscillographiques de la tension momentanée dans le parafoudre et les comparer avec ceux de la tension de contournement des isolateurs à protéger.

En vue d'obtenir des conditions bien caractérisées, les directives suisses pour l'essai des parafoudres ne tiennent pas compte de l'oscillation du courant du parafoudre, lors d'un coup de foudre à proximité de l'appareil. Ceci s'obtient par l'insertion d'une résistance d'amortissement R_d , égale à l'impédance d'onde du réseau ($R_d = 500 \Omega$). La ligne, d'une longueur aussi réduite qu'on le désire, présente alors les propriétés d'une ligne très longue, par le fait que les ondes réfléchies par le parafoudre et se dirigeant vers le générateur de chocs ne sont pas réfléchies par ce dernier. Un tronçon de ligne est très utile lorsqu'il s'agit de reproduire également la disposition du montage des parafoudres dans les stations, en vue de l'examen de la valeur de protection des parafoudres.

8. Cette installation de chocs émet les ondes mobiles utilisées pour l'essai des parafoudres. L'*onde normale d'essai* est une onde dont la durée du front (durée de l'accroissement) est de 0,5 à 1 μ s et dont la durée de mi-amplitude est de 25 à 30 μ s. On entend par la durée du front la durée de l'accroissement de l'onde d'essai, mesurée selon les normes prévus de la C. E. I., et par durée de mi-amplitude, la durée pendant laquelle la tension de l'onde est égale ou supérieure à la moitié de l'amplitude. Une tolérance de ces valeurs est nécessaire, afin de tenir compte de l'approximation des mesures. La capacité de choc nécessaire est de 0,08 μ F pour une impédance d'onde de la ligne de 500 Ω .

9. A l'aide d'ondes de cette forme, on détermine d'abord toutes les valeurs caractéristiques relatives à l'*effet de protection du parafoudre*. Ces valeurs sont :

- 1° La tension d'amorçage;
- 2° Le retard à l'amorçage;
- 3° La réduction de la tension, respectivement la tension résiduelle;
- 4° Les caractéristiques;
- 5° Le pouvoir d'écoulement.

La définition de ces valeurs, ainsi que l'exécution des essais, sont indiqués dans les « Directives » (voir p. 17). A ce sujet, l'amplitude de l'onde de choc pour l'essai de la réduction de tension (*onde maximum de choc*) mérite une explication. Elle a été déterminée par le raisonnement suivant : on sait que les surtensions d'ori-

gine atmosphérique les plus considérables se présentent dans le cas des lignes aériennes à très haute tension. Dans les stations à moyenne et basse tension les surtensions sont généralement moins élevées, même dans des réseaux sur poteaux en bois. Cela provient manifestement des pertes par effluves, qui sont sensiblement plus grandes sur les lignes et isolateurs pour tensions de service plus faibles. Au point de vue de l'économie du système, il semble également indiqué d'admettre pour les tensions de service élevées des contraintes plus sévères pour les appareils que dans le cas des tensions de service plus faibles; car on est généralement en droit d'exiger une plus grande sécurité de service des installations à tension de service élevée, que de celles à tension plus faible. Un échelonnement des ondes d'essai a donc été introduit dans les directives, selon le Tableau I.

Ce Tableau indique l'amplitude de l'onde d'essai en kilovolt-mètres pour chaque type de parafoudre, respectivement pour chaque tension normale. Ces amplitudes correspondent approximativement aux ondes de surtension maxima qui peuvent se produire dans les lignes sur pylônes en fer, où les supports d'isolateurs sont mis à la terre. Le fait qu'il n'est pas tenu compte de l'amortissement de l'onde entre le point foudroyé et le parafoudre donne un certain coefficient de sécurité et une légère marge pour l'accroissement oscillatoire du courant par suite de coups de foudre à proximité du parafoudre. Dans les stations raccordées à des *lignes sur pylônes en fer*, la plupart des ondes de surtension sont plus faibles que la tension de contournement des isolateurs de la ligne, à cause des pertes dans la ligne; cela s'entend également pour les coups de foudre directs provoquant un contournement de l'isolement de la ligne. En effet, exception faite des pointes de tension extrêmement brèves, la tension de la ligne à l'endroit du pylône foudroyé conserve une certaine valeur, qui correspond à la chute de tension ohmique du courant de foudre s'écoulant par la terre du pylône. Cette valeur est souvent plus faible que la tension de contournement des isolateurs. Toutefois, lorsqu'elle est plus élevée, le contournement se produit sur d'autres pylônes, jusqu'à ce que la surtension ne dépasse plus la valeur de la tension de contournement des isolateurs ⁽¹⁾. Si les pylônes foudroyés ne sont pas plus rapprochés

⁽¹⁾ Ces considérations sont motivées; car la pointe de tension de contournement de brève durée est très fortement amortie le long de la ligne et n'apparaît pratiquement dans les stations qu'avec une valeur fortement réduite.

du parafoudre que dans les exemples des figures 6, le courant du parafoudre n'atteindra pas des valeurs plus élevées que celles indiquées. Les coups de foudre à plus de 1 km du parafoudre ne provoquent donc pratiquement pas de contraintes extraordinaires dans le parafoudre.

En revanche, s'il s'agit de *coup de foudre à quelque 100 m du parafoudre*, la contrainte peut être plusieurs fois supérieure à celle de l'essai, car le courant dans le parafoudre atteint par oscillations un multiple de la valeur de l'onde primitive. Un cas aussi défavorable se présente également lorsque le coup de foudre se produit dans une *ligne sur poteaux en bois* à proximité du parafoudre; l'onde primitive peut alors avoir déjà une valeur supérieure à celle de l'onde normale d'essai; car les isolateurs de la ligne ne limitent pas la surtension contre la terre. C'est pour ces deux raisons qu'on a fixé la tension de contournement des isolateurs de ligne comme étant déterminante pour l'essai du parafoudre.

Lors de l'essai du parafoudre avec l'onde de choc u_w , selon le Tableau I des directives, la grandeur des courants dans le parafoudre dépend également de la tension aux bornes du parafoudre (tension résiduelle u_p). Les courants maxima pour une tension aux bornes du parafoudre $u_p = 2$ fois tension nominale du parafoudre ou $= 3$ fois cette tension, sont indiqués dans le Tableau II des directives. Ces valeurs se déterminent à l'aide de l'amplitude de l'onde de choc u_w et de la tension résiduelle u_p dans le parafoudre, selon la formule

$$I = \frac{2u_w - u_p}{500},$$

où le nombre 500 représente l'impédance d'onde de la ligne en ohms.

Afin de permettre une certaine latitude au développement des exigences auxquelles les parafoudres sont soumis et de tenir compte de la marge nécessitée par les considérations d'ordre économique, les directives prescrivent que, pour les parafoudres dont le pouvoir d'écoulement dépasse sensiblement la valeur minimum conforme au Tableau II, cette valeur doit être déterminée. Dans ce cas, il y a lieu d'indiquer l'amplitude maximum de l'onde d'essai de durée normale, respectivement le courant maximum admissible du parafoudre de durée normale.

10. L'essai de l'effet de protection d'un parafoudre n'est que celui d'une partie de ses propriétés fondamentales. La *sécurité de*

fonctionnement n'est pas moins importante. Un parafoudre jouant le rôle d'une valve contre les surtensions doit avant tout interrompre automatiquement et aussi rapidement que possible le courant de service qui s'établit ensuite. Pour examiner cette propriété, on monte (selon le schéma de principe de la figure 7) le transformateur T qui fournit une tension alternative correspondant à la tension nominale du parafoudre à essayer, et l'on fait fonctionner ce dernier par les surtensions indiquées ci-dessus. On mesure à l'aide de l'oscillographe cathodique ou d'un fréquencesmètre la durée du passage du courant de service.

En général, le parafoudre est essayé sous trois tensions de service différentes. La tension de phase, la tension composée et une tension égale à 1,2 fois la tension composée du réseau que le parafoudre doit protéger, la tension composée étant supposée égale à la tension nominale du parafoudre. La marge de sécurité de 20 % en dessus de la tension nominale a été prescrite afin de tenir compte des variations passagères de la tension en service normal et de l'écart entre la tension de production et celle de consommation.

La désignation de la tension des appareils diffère entre les constructeurs européens et américains. En Europe, il est d'usage de désigner les parafoudres selon leur tension nominale, comme pour les autres appareils. En revanche, les constructeurs américains indiquent parfois la tension maximum admissible de service (maximal-dynamic-voltage). Dans ce cas, on doit considérer le maximal-dynamic-voltage comme étant égal à 1,2 fois la tension nominale du parafoudre.

11. Champ d'application et conclusions. — On voit que, pour être efficace contre les ondes mobiles incidentes, un parafoudre doit pouvoir absorber des courants intenses et par conséquent des puissances (kW) considérables. Cependant, comme la durée des surtensions de foudre est brève, l'énergie (kW.s) mise en jeu est en revanche assez faible. Ainsi par exemple, pour un parafoudre de 15 kV dont la tension aux bornes (tension résiduelle) pendant l'écoulement d'un courant de choc de 1 000 A atteint environ 50 kV (valeur de crête), la puissance développée s'élève bien à 50 000 kW, mais l'énergie absorbée pendant la durée de mi-amplitude, soit 25 μ s, n'atteint que 1,25 kW.s. S'il s'agit d'un parafoudre de 50 kV, les chiffres correspondants sont les suivants :

Puissance sous 1500 A et 150 kV.....	225 000 kW
Energie absorbée en 25 μ s.....	5,6 kW.s

Étant donné que, pendant la très brève durée du choc, l'énergie transformée en chaleur par le parafoudre ne saurait être évacuée, il faut que le parafoudre possède une certaine capacité calorifique. Or, cette capacité doit être plus grande que le minimum déduit de l'énergie libérée pendant la surtension proprement dite et ce pour la raison suivante : la plupart des parafoudres pour réseaux alternatifs n'interrompent pas le courant immédiatement après que la surtension ait cessé, mais seulement à l'instant du passage par zéro du courant alternatif de service. Par conséquent, la durée du courant à travers le parafoudre est très souvent non pas celle de la surtension, mais celle d'une demi-période du courant alternatif, soit $1/100$ ou $1/33$ de seconde, suivant la fréquence du réseau.

Bien que le courant qui traverse le parafoudre soit beaucoup plus faible sous la tension de service que pendant la surtension, la durée de $1/100$ de seconde est tellement plus longue que celle de $25 \mu\text{s}$ ($1/40\,000$ de seconde) que l'énergie dont il faut tenir compte est déterminée en général non par la durée de la surtension, mais par celle du courant de service consécutif. Aussi la durée du courant de service à travers le parafoudre, dont les « Directives » prescrivent la détermination, donne-t-elle dans la plupart des cas une mesure relative de l'échauffement du parafoudre.

Les considérations qui précèdent montrent d'autre part que le fonctionnement répété d'un bon parafoudre constitue aussi un danger thermique pour cet appareil, même quand la surtension provoquant l'amorçage est faible. Par conséquent, pour avoir des parafoudres efficaces contre les surtensions d'origine atmosphérique, qui ne soient par eux-mêmes la source de perturbations de service, il est généralement nécessaire de fixer leur tension d'amorçage plus haut que les pointes de surtension prenant naissance dans le réseau, surtout par suite de mises à terre (éventuellement aussi par des phénomènes d'enclenchement et par des court-circuits). Seuls les parafoudres largement calculés au point de vue thermique, éventuellement aussi ceux doués d'un effet de valve prononcé, permettent d'adopter de plus basses tensions d'amorçage.

Il s'ensuit que l'application des parafoudres proprement dits demeure circonscrite en général au domaine des seules surtensions qui ne se répètent pas à intervalles trop rapprochés.

C'est pourquoi, dans les « Directives » reproduites en annexe,

on ne parle à dessein que de « parafoudres », et non de « parasurtensions » au sens le plus général du mot. Les surtensions provoquées par une mise à terre intermittente doivent pouvoir être supportées sans parafoudres par le réseau à protéger. Il n'entre pas dans le rôle des parafoudres de combattre des surtensions de ce genre-là.

Les directives susmentionnées s'appliquent principalement aux parafoudres destinés aux réseaux de lignes aériennes, qui seuls sont soumis aux effets dangereux de la foudre. Toutefois, ces mêmes exigences doivent être également requises des parafoudres destinés aux réseaux mixtes, c'est-à-dire aux réseaux comportant de courts tronçons sous câble; car les tronçons sous câble d'une longueur inférieure à quelques centaines de mètres ne provoquent pas une réduction suffisante du gradient de potentiel des ondes de surtension. S'il s'agit par contre de tronçons sous câble de plusieurs kilomètres de longueur, ceux-ci exercent eux-mêmes un effet de parafoudre, de sorte qu'une protection spéciale par parafoudres est superflue. Ces directives ne sont pas applicables aux parafoudres destinés à des réseaux entièrement souterrains et à des réseaux comportant plusieurs kilomètres de câbles entre ligne aérienne et station; car, d'une part, la présence de fortes surtensions dans les réseaux sous câble est fort douteuse et, d'autre part, les conditions d'essais devraient être adaptées aux amplitudes des surtensions éventuelles et à l'impédance d'onde du câble.

En résumé, ces directives ont pour but de vérifier l'utilité pratique des parafoudres et de comparer les divers types de parafoudres sur une base rationnelle. Ces conditions d'essai doivent être considérées comme les exigences minima que l'on est en droit de poser aux appareils modernes. Ce point de vue est d'autant plus défendable qu'il existe déjà un certain nombre de types de parafoudres satisfaisant à ces conditions. L'auteur espère pouvoir présenter dans la suite un Rapport détaillé sur les nombreux résultats déjà obtenus.

Les directives de l'Association Suisse des Électriciens pour l'essai et l'appréciation des parafoudres seront remises à toute personne qui en fera la demande à l'Auteur ou à la Conférence.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS

102787-35 Quai des Grands-Augustins, 55.
