

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 17 (1926)
Heft: 6

Artikel: Guide pour la protection des installations électriques à courant continu contre les surtensions
Autor: [s.n]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058865>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des } REDAKTION { Secrétariat général de
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des } Zürich 8, Seefeldstr. 301 { l'Association Suisse des Electriciens et de
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration { Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. } Editeur et Administration
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38 }

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | sans indication des sources

XVII. Jahrgang
XVII^e Année

Bulletin No. 6

Juni 1926
Juin

Guide pour la protection des installations électriques à courant continu contre les surtensions.

Etabli par le groupe b¹⁾ (protection contre les surtensions) de la commission pour les appareils à haute tension et la protection contre les surtensions et l'incendie, de l'Association Suisse des Electriciens (A. S. E.) et de l'Union de Centrales Suisses d'Electricité (U. C. S.).

A. Introduction.

Rédigée en allemand par M. le Dr Schait, ing., Zurich, sur la demande du groupe b.

A l'exception des installations à faible courant, les installations à courant continu sont actuellement bien moins répandues que celles à courant alternatif. On les rencontre, à côté des installations à courant alternatif, dans le domaine des basses tensions courantes (en Suisse entre 100 et 500 volts) et d'autre part dans celui des transports d'énergie à grande distance. La traction électrique a ouvert aussi un vaste champ d'application au courant continu: dans la majorité des cas les tramways urbains et de banlieue sont actionnés par ce genre de courant, de même que la plupart des chemins de fer interurbains; le courant continu a été choisi également pour la traction électrique sur des réseaux importants à voie normale.

Bien que les limites d'application du courant continu ne soient pas rigides, mais influencées par l'état momentané de la technique et par des considérations d'ordre économique, on peut dire cependant qu'aujourd'hui il y a peu d'installations à courant continu de tensions comprises entre 3000 et 50000 volts.

Le présent guide se propose de donner d'une façon générale des indications relatives à la protection de toutes ces installations à courant continu, sans fixer des directives spéciales pour les diverses formes d'emploi de ce courant, du moment qu'il s'agit pour chacune d'elles des mêmes phénomènes physiques. Mais il va sans dire que l'importance des mesures de prévention et de protection pourra varier d'un cas à l'autre; dans ce qui suit, l'attention sera attirée sur chacun de ces cas.

Les causes susceptibles de faire naître des surtensions dangereuses dans des installations à courant continu peuvent être classées comme suit:

- 1^o *Passage direct du potentiel* de l'atmosphère sur des lignes aériennes lors de coups de foudre directs, ou du potentiel d'une installation à une autre de tension différente ensuite d'une connexion accidentelle.

1) Le groupe b se compose de M. Kummer, professeur à Zurich, président, de MM. Dr Bauer-Schaffhouse, Belli-Genève, Courvoisier-Baden, Gysel-Zurich, Schmidt-Lausanne, Thury-Genève, Wick-Zurich, et du secrétaire général de l'A. S. E. et de l'U. C. S. Collaborateur: M. le Dr Schait, ing., Zurich.

- 2° Induction électrostatique due à l'atmosphère ou à des installations voisines de tension très différente.
 3° Déclenchement de circuits électriques.
 4° Ondes à front raide.
 5° Résonances.

1° Passage direct de tension d'un circuit à un autre.

La forme la plus dangereuse se présente lors de coups de foudre directs, c'est-à-dire quand le canal de décharge entre un nuage et la terre touche une ligne aérienne. Si cette dernière n'est pas détruite immédiatement à l'endroit où elle a été touchée, il en résulte du moins des éclatements entre la ligne et la terre. En plus de l'élévation de tension de la conduite électrique par rapport à la terre, ces

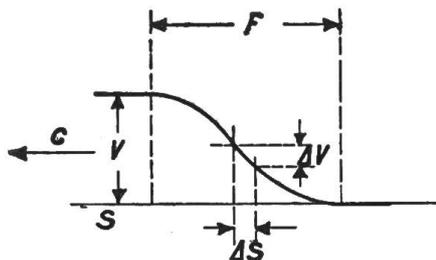


Fig. 1.
Onde de décharge.
 F = front d'onde.
 V = amplitude.
 S = ligne.

engendrent des ondes de décharge ou une série d'ondes de charge et de décharge combinées (voir fig. 1 et 2). Ces ondes à front raide provoquent des courts-circuits entre bobines, couches ou spires voisines dès qu'elles pénètrent dans les enroulements de machines.

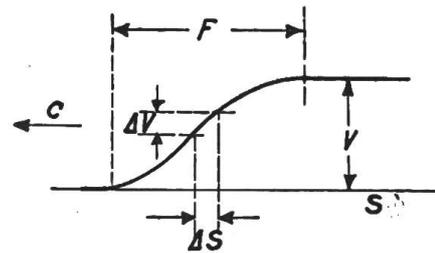


Fig. 2.
Onde de charge.
 C = vitesse de propagation de l'onde.
 $\frac{DV}{ds}$ = inclinaison du front d'onde.

Le gradient du champ électrostatique atmosphérique étant plus grand aux points culminants qu'en plaine, c'est en terrain accidenté que les coups de foudre directs et indirects sont le plus à craindre. Dans ces régions exposées, on fera bien de munir les isolateurs fixes d'un anneau métallique protecteur entourant l'isolateur à la hauteur de sa base (voir fig. 3). Cet anneau a pour but d'écarter de l'isolateur l'arc prenant naissance entre le conducteur et le support, et d'éviter ainsi un échauffement funeste du corps de porcelaine. Il tend aussi à empêcher la fusion du conducteur en permettant à l'arc de se ramifier au lieu de rester concentré en un point qui sera fortement surchauffé. Pour les chemins de fer, où n'interviennent que des tensions relativement basses, on peut, dans la règle, se dispenser de munir les isolateurs d'anneaux ou de cornes métalliques.

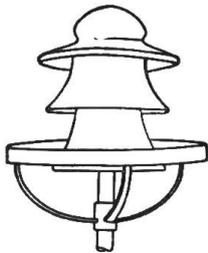


Fig. 3.
Isolateur de support
avec anneau de protection.

Jusqu'à ce jour on n'a pas encore découvert de moyens pratiques pour empêcher l'effet destructif des coups de foudre directs, qui ne se fait sentir du reste que dans un rayon restreint autour du point frappé.

En cas de liaison directe entre parties d'installations sous tensions différentes, soit par un arc, soit par contact direct, l'objet dont le potentiel normal est le plus faible est soumis à une surtension. Toutefois la probabilité d'un tel phénomène est notablement amoindrie si l'on a soin d'écarter suffisamment les conducteurs et de veiller à une disposition judicieuse des croisements de lignes.

2° Induction électrostatique.

Les lignes aériennes sont sous l'influence du champ électrostatique de l'atmosphère; elles sont donc le siège de charges statiques dont le potentiel se superpose à la tension d'exploitation.

Ces charges peuvent se former lorsque le champ statique se modifie lentement (déplacement de nuages, etc.). Le phénomène étant lent, la charge se répartit uni-

formément sur le réseau. Lorsque l'isolation est parfaite et qu'aucun point du réseau n'est mis à la terre, il peut s'établir entre réseau et terre des différences de potentiel élevées pouvant donner lieu à des arcs.

Des charges de ce genre peuvent aussi être libérées lorsque le champ statique se modifie brusquement (décharge vers la terre d'un nuage placé au-dessus du réseau). On parle alors de *coups de foudre indirects*: la charge accumulée sur un tronçon de ligne s'écoule dans les deux sens en donnant lieu à deux ondes de charge (voir fig. 2). Quoique ces ondes n'aient pas des fronts très raides, elles sont cependant dangereuses parce que la tension entre fil et terre peut momentanément être très élevée et produire un arc.

Il est possible d'atténuer par des mesures préventives le danger auquel donnent lieu des surtensions de ce genre. C'est ainsi que l'accumulation lente de charges statiques peut être empêchée par évacuation constante des quantités d'électricité au moyen de dispositifs de mise à la terre sans influence sur le fonctionnement normal de l'installation (p. ex. résistances métalliques, voir fig. 4). Pour les réseaux qui possèdent une mise à la terre permanente, ces dispositifs sont naturellement superflus.

Un fil de terre placé au-dessus de la ligne et sur toute sa longueur réduit les surtensions, mais son effet protecteur n'est pas grand. Il n'est pas indiqué de munir une ligne de plus d'un fil protecteur; celui-ci ne se justifie du reste que s'il sert aussi à améliorer la mise à terre des pylônes métalliques. Pour une ligne sur poteaux de bois, le fil de terre ne se recommande pas parce que, s'il réduit les surtensions de 30% environ, il diminue aussi, et dans une bien plus forte mesure, l'isolation de la ligne par rapport à la terre.

On peut dire d'une manière générale que le fil de terre est moins employé pour les lignes aériennes à courant continu que pour celles à courant alternatif.

On constate sur les lignes de parcours parallèle des surtensions due à des effets de capacité. Les tensions de cette origine peuvent atteindre des valeurs dangereuses pour un réseau à courant continu si des lignes à haute tension alternative courent parallèlement à des lignes à courant continu bien isolées. On peut réduire ces tensions à une valeur inoffensive en intervertissant les phases de la ligne à courant alternatif. Mais s'il s'agit d'installations à basse tension, la tension due aux effets de capacité est insignifiante à cause de l'isolation plus faible correspondant à la tension de service moindre de ces réseaux à courant continu, de sorte qu'il paraît superflu de procéder à une rotation des phases ou de recourir à d'autres mesures analogues. La même remarque s'applique aux installations de traction dans lesquelles les véhicules jouent le rôle de mise à la terre en reliant directement le fil de contact aux rails. Pour éviter des accidents au personnel occupé à des travaux sur une ligne aérienne parallèle à d'autres, on aura soin de mettre tous les conducteurs à la terre, de part et d'autre du chantier de travail.

3^o Déclenchement de circuits électriques.

Des surtensions dangereuses ne surgissent que lors du déclenchement d'enroulements à noyau de fer (extra-courants de rupture). Des essais de laboratoire ont montré que, dans ce cas, la surtension peut atteindre 50 fois la valeur de la tension de service. Un moyen de réduire ces surtensions à une valeur inoffensive consiste à shunter les enroulements en question ou leurs interrupteurs.

Quant au type d'interrupteurs, l'expérience, confirmée par des essais, a montré que l'interrupteur à air donne lieu à moins de surtensions que l'interrupteur à huile, pour autant qu'il s'agit de courant continu. L'interrupteur à huile pour courant continu présente aussi les inconvénients suivants: Il est nécessaire de dis-

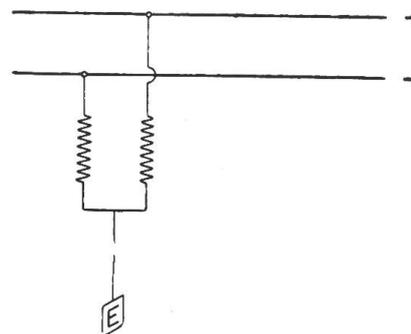


Fig. 4.
Résistances métalliques pour l'évacuation de charges statiques.

poser les contacts à une grande profondeur dans l'huile; celle-ci se charge de suie au bout de quelques manœuvres, même si les puissances mises en jeu sont relativement faibles.

Les interrupteurs à air avec soufflage magnétique, prévus comme interrupteurs ultra-rapides, ont plutôt la tendance à produire des surtensions, étant donné que l'arc est subitement déchiré, et que toute l'énergie magnétique liée au courant se transforme en énergie électrique; mais les interrupteurs ultra-rapides sont utilisés dans des circuits tels que l'énergie qui y est libérée sous forme magnétique peut se dissiper en grande partie dans les résistances ohmiques du circuit et dans les dérivations dues à une isolation imparfaite. (L'énergie libérée p. ex. lors du déclenchement brusque de l'excitation de commutatrices peut se transformer en chaleur dans le circuit du rotor.)

Le déclenchement normal de lignes à courant continu en charge ne provoque pas de surtensions nécessitant des dispositifs de protection spéciaux.

Les ondes de charge et de décharge qui prennent naissance au moment de l'enclenchement ou du déclenchement sont fortement amorties par suite de l'arc, ce qui fait que le front de l'onde n'est pas raide et que les enroulements ne courent pas de danger.

Au point de vue de la production de surtensions au déclenchement, les fusibles présentent sensiblement les mêmes propriétés que les interrupteurs ultra-rapides avec soufflage magnétique. Il n'est pas possible d'indiquer une limite supérieure exacte de l'intensité du courant pour l'utilisation de fusibles. En revanche, et en vue d'éviter des surtensions, leur emploi est à déconseiller à partir de 400 volts environ pour les fortes intensités.

4^o Ondes à front raide.

L'oscillation consiste dans la transformation périodique d'une forme d'énergie dans une autre. Du fait de la self-induction et de la capacité du circuit, l'énergie électrique se transforme en énergie magnétique et inversement. Lorsque self et capacité sont uniformément réparties, on parle d'ondes mobiles (Wanderwellen); celles-ci sont, soit des ondes de charge, soit des ondes de décharge, soit encore alternativement l'une et l'autre.

Les ondes de décharge (fig. 1) prennent naissance lorsqu'un arc se forme entre un point d'un circuit électrique et la terre ou entre ce point et un point de polarité différente. Le point d'où l'arc jaillit prend alors instantanément un potentiel différent. Comme ce changement ne peut se propager qu'avec une vitesse finie, les points voisins gardent encore momentanément le potentiel primitif et il se produit une forte chute de potentiel dans le sens du circuit et sur une très faible longueur de celui-ci. Cette chute, qui se propage avec une grande vitesse le long de la ligne, sera accentuée encore si le potentiel de la ligne a été porté précédemment à une valeur anormale. Les mises à terre (arcs de décharge ensuite de surtensions d'origine atmosphérique ou contacts directs), les court-circuits et chaque manœuvre modifiant le régime, peuvent faire naître des ondes de décharge. Lorsqu'une onde de décharge atteint un enroulement, les premières spires de celui-ci peuvent, par suite de l'éclatement d'un arc à la terre, être mises au potentiel 0 par rapport à la terre alors que les spires suivantes gardent encore la tension primitive; il se peut alors qu'entre deux parties voisines de l'enroulement la tension atteigne momentanément le centuple de la tension en service normal.

Les ondes de charge (fig. 2) ont leur origine dans une augmentation brusque du potentiel et un point d'un circuit (lors de manœuvres de couplage, dans le cas d'un coup de foudre direct) ou sur toute la longueur d'un circuit (en cas de coup de foudre indirect). Il se produit de nouveau une forte chute de potentiel dans le sens du circuit, dont les conséquences sont en principe les mêmes que celles des ondes de décharge. La pratique a montré cependant qu'en ce qui concerne la chute de potentiel elle-même, le danger est moindre dans le cas des coups de foudre

indirects (chutes de potentiel très peu abruptes) ainsi que dans le cas de manœuvres de couplage (différences de potentiel peu élevées).

Les ondes mobiles qui présentent un front raide sont appelées ondes à front raide (Sprungwellen).

Dès qu'on eût reconnu le danger des ondes à front raide, on chercha les moyens d'adoucir leur raideur, de les réfléchir et de les écouler à terre. Les bobines de self et les condensateurs furent employés pour renvoyer les ondes sur la ligne et pour adoucir la raideur des fronts d'onde. Dans les parafoudres à cornes, à rouleaux avec résistances, et autres, on crut avoir trouvé des moyens pour écouler les ondes à front raide à la terre. Les bobines de réactance devaient protéger les machines en renvoyant les ondes à front raide sur la ligne où, par l'effet de la résistance ohmique, leur énergie devait se transformer en chaleur. Comme on a introduit, jusqu'à présent, dans le calcul des bobines de réactance des simplifications qui se sont montrées inadmissibles, et qu'on ne connaît à ce jour que très imparfaitement le rôle que jouent les selfs, l'efficacité de ces appareils doit encore être démontrée par l'expérience.

Les condensateurs ne peuvent être efficaces qu'à condition d'avoir une capacité suffisante. Ils doivent naturellement avant tout résister eux-mêmes aux surtensions et être soumis à des épreuves préalables pour le moins équivalentes à celles qu'on fait subir aux autres parties de l'installation.

Les bobines de self et les condensateurs entrent spécialement en considération dans les installations à courant continu-série-haute tension pour la protection de génératrices et de moteurs connectés non pas à des câbles souterrains mais à des réseaux aériens.

Les déchargeurs à étincelles ne remplissent que rarement leur but parce que la résistance placée en série, indispensable pour éteindre sûrement l'arc et l'empêcher de devenir permanent, est en général beaucoup trop grande pour permettre l'écoulement de l'énergie contenue dans l'onde à front raide. Cette résistance ne devrait pas dépasser la valeur caractéristique¹⁾ (Wellenwiderstand) de la ligne aérienne à laquelle le parafoudre est connecté, c'est-à-dire ne pas être supérieure à $500 \div 600$ ohms. La construction de résistances, qui devraient toujours être en état de fonctionner sûrement, rencontre des difficultés dès qu'il s'agit de tensions élevées. Pour les faibles tensions de service, la distance explosive des cornes doit être faible aussi pour que la protection des installations soit efficace. Il en résulte que la poussière, la pluie, etc., en pénétrant entre les électrodes, peuvent abaisser considérablement la tension d'éclatement du déchargeur, et provoquer ainsi des perturbations de service désagréables; pour cette raison, ces appareils doivent être soigneusement protégés contre les corps étrangers, ou du moins fréquemment nettoyés. Des résistances liquides en série avec les parafoudres ne sont pas recommandables, car elles s'échauffent rapidement, ce qui fait que leur résistivité diminue et qu'elles laissent alors passer trop de courant. L'arc amorcé persiste et saute à la terre, ou bien il y a projection de liquide au dehors (explosion). L'avenir nous apprendra ce qu'il faut penser des nouveaux déchargeurs à extinction automatique de l'arc. On manque d'observations précises et sûres pour pouvoir recommander les autres déchargeurs.

En principe, les déchargeurs à étincelles constituent un bon moyen de protection contre les surtensions. Ils pourront rendre de bons services à condition:

1^o de fonctionner pour un réglage donné à une tension bien déterminée et pratiquement constante;

2^o que la valeur ohmique de la résistance soit aussi faible que possible et en tous cas inférieure à la valeur caractéristique de la ligne protégée;

3^o qu'à l'amorçage de l'arc la résistance limite et coupe immédiatement le courant d'exploitation qui tend à s'écouler, sans provoquer de perturbations.

¹⁾ On entend par là la racine carrée du rapport de l'inductance à la capacité contre terre de 1 km de conducteur simple.

Il n'est pas encore possible aujourd'hui de préciser suffisamment l'influence des bobines de réactance et des condensateurs sur les ondes perturbatrices.

De ce que nous venons de dire, il résulte qu'il n'existe pas actuellement de moyen de protection sûr contre les effets des ondes à front raide et que le mieux qu'on puisse faire pour de nouvelles installations, c'est de construire des enroulements capables de supporter les surtensions dues aux ondes à front raide.

5° Résonances.

A chaque circuit électrique contenant self et capacité correspond une fréquence de résonance ou fréquence propre, caractérisée par les valeurs de la self et de la capacité. Lorsqu'une source extérieure fournit à ce circuit un courant de fréquence égale à cette fréquence propre, il se produit un phénomène de résonance, les oscillations sont amplifiées et il y a surtension ou surintensité. L'analogie mécanique suivante permet de se faire une idée plus claire de ce phénomène: On peut comparer la notion d'„inductivité“ à une „masse“ et celle de „capacité“ à un „ressort“. En suspendant la masse au ressort, on obtient un système susceptible d'osciller à la suite d'une impulsion initiale. Le nombre d'oscillations effectuées par ce système dans l'unité de temps est bien déterminé par la grandeur de la masse et par la force du ressort: on l'appelle fréquence propre. Dès qu'on excite un tel système, oscillant à sa fréquence propre, par une impulsion extérieure variant suivant le même rythme que cette fréquence propre, les oscillations vont toujours en s'amplifiant. On dit que le système est en résonance. Dans une installation, des phénomènes de résonance pourront être amorcés à la fréquence des harmoniques du courant d'exploitation, ou encore à la fréquence des ondes à front raide.

Les cas de résonance dûs aux harmoniques du courant d'exploitation ne donnent généralement pas naissance à des surtensions dangereuses. La fréquence des ondes à front raide concorde en revanche plus souvent avec celle de circuits locaux, formés par la capacité des barres collectrices et la self de bobines protectrices, d'où résultent des phénomènes de résonance plus redoutables. On combattra ces derniers en shuntant par des résistances les inductivités du circuit, comme les selfs de protection et les bobines des relais. Ces shunts exercent un effet amortissant dans le circuit oscillant.

B. Directives.

1° Genres de surtensions dans les installations électriques à fort courant.

1° Il y a surtension chaque fois que la différence de potentiel entre deux points quelconques d'une installation dépasse la différence de potentiel existant en service normal. Le danger des surtensions dépend de leur valeur absolue, de leur répartition sur les conducteurs et dans le diélectrique, de leur durée et de leur fréquence (répétition). L'expérience montre que dans les installations prévues pour une tension de service d'au moins 1500 V, il est indiqué de considérer comme dangereuse toute surtension qui dépasse les 75% de la tension d'essai de la partie de l'installation qui a subi l'essai le moins sévère, pour autant que l'isolant est constitué par de l'air. Lorsque le diélectrique est une matière solide, et que la surtension n'est que momentanée, le danger n'existe que pour des tensions supérieures à celle indiquée (grande rigidité diélectrique momentanée). En ce qui concerne les enroulements, on peut dire qu'une répartition de la tension sur les conducteurs et dans le diélectrique devient dangereuse dès que la contrainte exercée est supérieure à celle qui a été produite lors des essais. Il n'est pas encore possible aujourd'hui de dire dans quelle proportion le danger croît avec la durée et la fréquence (répétition) des surtensions.

Dans les installations de moins de 1500 V, dans lesquelles l'isolation diminue avec le temps dans une mesure indéterminée, les personnes peuvent être mises en danger par des surtensions inférieures à la limite définie ci-dessus.

2^o Les surtensions dangereuses peuvent être classées comme suit:

- a) surtensions d'origine atmosphérique,
- b) surtensions dues aux manœuvres de couplage,
- c) surtensions dues aux phénomènes de résonance,
- d) passage direct de tension d'un circuit à un autre,
- e) surtensions transmises par effet de capacité,
- f) surtensions combinées.

Classificac
des surten

3^o Soit une ligne aérienne et considérons les deux capacités montées en série, dont les électrodes sont „nuage-fil“ d'une part et „fil-terre“ d'autre part. Le champ électrique atmosphérique induit dans ce système des tensions dont la répartition entre les deux capacités peut devenir telle que la tension „fil-terre“ prend des valeurs dangereuses (charges statiques lentes). Par suite des modifications momentanées qui se produisent dans le champ électrostatique pendant les orages, des charges d'électricité fixées sur le fil peuvent être libérées (coups de foudre indirects) et donner lieu à des arcs vers la terre et à des ondes à front raide dangereuses.

Surtensi
d'origir
atmosphé

Le conducteur aérien peut aussi, bien que cela arrive plus rarement, être touché par la foudre (coup de foudre direct).

4^o Il peut se former des surtensions dangereuses lors du déclenchement d'enroulements à forte self-induction. En général, tout enclenchement et déclenchement donne naissance à des ondes à front raide dont l'amplitude, dans la plupart des cas, n'atteint cependant pas une valeur dangereuse.

Surtensi
dues au
manœuv
de coupl

5^o Des surtensions dues à des cas de résonance amorcés par des trains d'ondes à front raide peuvent prendre naissance à la suite de phénomènes de charge et de décharge, si la fréquence des ondes incidentes coïncide plus ou moins avec la fréquence propre de circuits oscillants constitués par des inductivités (relais ou bobines de self), en série avec des capacités (câbles).

Surtensi
dues au
phénomè
de résona

Les surtensions dues à des résonances amorcées à la fréquence des harmoniques n'atteignent pas de valeurs dangereuses dans les installations à courant continu.

6^o Il se produit un passage direct de tension lorsque, dans une installation, des parties à tensions différentes ou appartenant à des systèmes de courant séparés sont reliées entre elles, soit par contact métallique direct, soit par un arc électrique.

Passage c
de tension
circuit à un

7^o Des surtensions dues à des effets de capacité peuvent se produire sur des lignes parallèles isolées l'une de l'autre, en particulier aussi sur une ligne à courant continu courant le long d'une ligne à courant alternatif haute tension; mais ces surtensions ne sont pas dangereuses en général.

Surtensi
transmises
effet de cap.

8^o Des surtensions combinées se produisent par superposition ou enchaînement des causes de perturbation énumérées sous 3 à 7.

Surtensi
combiné

2^o Méthodes à suivre pour la protection des Installations.

a) Isolation de l'installation.

9^o L'isolation des machines et autres appareils doit être soumise à une épreuve de tension suivant normes spéciales²⁾.

Rigidité
diélectrique
des isolat
des machi
et appare

10^o Les isolateurs fixes, à suspension et de traversée, doivent être dimensionnés de telle sorte que la tension de percement soit plus grande que la tension de contournement de l'isolateur sec et propre. En service, les isolateurs ne doivent présenter aucune trace d'effluves.

Résistan
des isolat
au percen

11^o Dans les installations avec réseaux aériens, la résistance électrique des isolants contre des surtensions de courte durée doit être si possible du même ordre de grandeur dans toutes les parties de l'installation. On peut alors prévoir qu'en cas de coups de foudre indirects les arcs de décharge se produiront sur les lignes et non dans les stations qui ne seront atteintes que plus tard par la surtension. Il y a lieu de remarquer que les isolants solides de même rigidité diélec-

Rigidité
diélectrique
de l'isolat
de l'installa

²⁾ On a prévu déjà l'élaboration de telles normes.

trique à l'essai de durée présentent, pour une courte durée de la surtension, une rigidité momentanée sensiblement supérieure à celle de l'air.

b) Mesures de prévention.

12° Avant de penser à installer des appareils de protection, le praticien doit prendre toutes les mesures possibles pour éviter la formation de surtensions et pour empêcher que d'autres surtensions ne se forment à la suite de la première surtension survenue. On n'aura recours à des appareils de protection que si toutes les mesures préventives appliquées ne donnent pas une sécurité suffisante.

13° Les surtensions dues aux phénomènes atmosphériques sont inévitables sur les lignes aériennes. Elles peuvent cependant être réduites en amplitude par l'emploi d'un fil de terre tiré au-dessus de la ligne.

Lorsque la ligne est montée sur poteaux de bois, le fil de terre a l'inconvénient de diminuer la résistance d'isolement de la ligne et il est préférable dans ces cas de s'en passer. Les anneaux métalliques placés à la base des isolateurs fixes et les cornes dont on munit les isolateurs de suspension protègent les isolateurs contre la destruction et les conducteurs contre la fusion par l'arc. Leur emploi est recommandable dans les parties d'une ligne particulièrement exposées à la foudre et sur les pylônes métalliques intercalés en petit nombre dans une ligne sur poteaux.

14° On peut prévenir les surtensions élevées dues au déclenchement d'enroulements à noyau de fer en shuntant ceux-ci ou en plaçant éventuellement une résistance en série avec eux. En général, les interrupteurs à l'huile ne sont pas à conseiller, tandis que les interrupteurs à air sont recommandés.

15° On peut amortir les surtensions de résonance dues à la pénétration de trains d'ondes à front raide dans des circuits oscillants locaux, en y intercalant des résistances ohmiques.

16° Pour empêcher le passage direct du courant haute tension dans le circuit basse tension, il est nécessaire d'écarter partout suffisamment les différents circuits. Les croisements de lignes seront faits avec soin et les bâtis seront reliés à une terre convenable.

17° Pour supprimer le danger des surtensions dues à la capacité entre deux lignes parallèles de tensions différentes, le moyen le plus recommandable consiste dans l'éloignement partiel d'une des lignes ou dans l'augmentation de la capacité vis-à-vis de la terre de la ligne à tension moindre (par l'emploi de câbles ou de condensateurs). Tous les fils d'une ligne sur laquelle on exécute des travaux doivent toujours soigneusement être mis à terre de part et d'autre du champ de travail.

c) Choix des moyens de protection contre les surtensions.

18° Pour évacuer les charges statiques provenant du champ électrique de l'atmosphère, on connectera des résistances de décharge entre les barres collectrices et la terre. Si la corrosion de conduites métalliques souterraines est à craindre, il y aura lieu de substituer aux déchargeurs à eau courante des résistances métalliques ou au carborundum. Des résistances de décharge sont superflues dans les installations de traction avec un pôle à la terre, de même que dans les distributions à trois fils dont le conducteur médian est au sol, étant donné que, dans ces cas, il existe déjà un chemin direct vers la terre.

19° Le danger créé par les coups de foudre indirects peut être atténué dans certains cas à l'aide de parafoudres à étincelles. On protège par ce moyen surtout les génératrices et les moteurs à haute tension des installations-série, ainsi que toutes les installations dont la tension de service est comprise entre 1500 et environ 5000 volts. Mais ces parafoudres n'ont une utilité que si leur tension de perçement, resp. leur tension d'éclatement demeure à peu près constante pour une position de réglage donnée, que s'ils peuvent fonctionner plusieurs fois de suite pendant un temps suffisant sans être détériorés et, dans le cas de lignes aériennes, que si leur résistance est inférieure à la valeur caractéristique d'une ligne aérienne, c'est-à-dire inférieure à 600 ohms environ.

Surtensions
générales.

Moyens
prévention
contre
surtensions
d'origine
atmosphérique.

Moyens
prévenir les
surtensions dues
à manœuvres
coupage.

Moyens
prévenir les
surtensions dues
à résonance.

Moyens
prévenir
le passage direct
de la tension
dans un circuit
autre.

Moyens
prévenir
les surtensions
causées par
la capacité.

Charges
atmosphérique
formation
lente.

Charges de foudre
indirectes.

20^o La raideur du front d'onde qui crée les tensions anormales entre spires voisines d'un enroulement peut être adoucie par l'insertion à l'entrée des enroulements de capacités ou de selfs concentrées. Comme il est difficile de réaliser des enroulements qui peuvent résister à ces surtensions, il sera utile de connecter les lignes aux machines et appareils par l'intermédiaire soit de sections de câbles, soit de condensateurs, soit de selfs, ou bien à la fois par des condensateurs et des selfs. Il n'est malheureusement pas possible de donner la valeur exacte de l'inductivité et de la capacité nécessaires. Comme les selfs et les capacités peuvent constituer des circuits locaux de résonance, il est bon de leur adjoindre des résistances d'amortissement.

3^o Tableau récapitulatif.

21^o Le tableau suivant donne un résumé des surtensions de sources diverses et des moyens pour les combattre. Pour combattre les surtensions combinées il faudra combiner aussi les moyens de protection préconisés.

Aperçu des moyens de protection recommandables pour les installations à courant continu.

Genre de surtension	Tension d'exploitation de moins de 1500 volts		Tension d'exploitation de plus de 1500 volts		Chemins de fer
	Réseaux aériens	Réseaux à câbles	Réseaux aériens	Réseaux à câbles	
Charge statique lente de lignes aériennes, d'origine atmosphérique	N'offrent pas de danger.	Point de surtensions atmosphériques	Dans les réseaux isolés, c. à d. n'ayant à la terre ni pôle ni conducteur neutre, on intercalera des résistances de décharge entre les fils et la terre (grosses résistances métalliques, hydrauliques ou à charbon).	Ne se produisent pas	Sans danger par suite de la mise à la terre d'un pôle
Coups de foudre indirects	Dans les centrales et les sous-stations, employer des parafoudres déchargeurs, protégés contre la pluie et la poussière	Ne se produisent pas	La résistance au percement doit être si possible du même ordre de grandeur pour les appareils des stations et sous-stations que pour les isolateurs des lignes. La résistance des isolants entre spires doit être aussi grande que possible. Les selfs, bobines, etc. doivent être shuntées par des résistances. Employer des anneaux de protection pour les isolateurs de lignes aériennes dans les régions exposées. Entre lignes aériennes et génératrices ou moteurs qui leur sont directement connectés, on intercalera des tronçons de câbles (condensateurs) ou des selfs. On prévoira éventuellement des parafoudres déchargeurs à étincelles.	Ne se produisent pas	
Surtensions dues aux manœuvres de couplage	Les interrupteurs ou les enroulements à noyau de fer (excitation des machines) seront shuntés par des résistances; on placera éventuellement des résistances en série avec eux; ces surtensions n'offrent sans cela pas de danger. Pour des tensions de 400 volts et au-dessus, on fera usage d'interrupteurs capables de couper l'arc d'une façon sûre (interrupteurs à air), éventuellement avec résistances montées en parallèle. Dès 400 volts environ et pour de grandes intensités, on évitera l'emploi de fusibles.				
Surtensions dues à des résonances amorcées par des ondes de décharge, lors de courts-circuits ou de mises à la terre.	N'offrent pas de danger	N'offrent pas de danger	Shunter les inductivités, selfs, bobines de relais, etc. par des résistances.		
Passage direct de tension d'un circuit à un autre	Mise à la terre du neutre dans les distributions à 3 fils. Exécution soignée des croisements de lignes; distances aussi grandes que possible entre conducteurs appartenant à des parties d'installation de tensions différentes. Mise à la terre des bâtis.				
Surtensions transmises par effet de capacité	En cas de parallélisme de lignes à tensions différentes, il est bon de déplacer, en partie du moins, l'une des lignes; on peut aussi augmenter la capacité de la ligne à tension la plus basse au moyen de câbles ou de condensateurs.				