

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 59 (1968)
Heft: 20

Artikel: Le déclenchement précis de générateurs d'ondes de choc à une tension de charge affichée
Autor: Rodewald, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057425>

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: 21.02.2026

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

Le déclenchement précis de générateurs d'ondes de choc à une tension de charge affichée

Par A. Rodewald, Bâle

621.319.53

Au début de cet exposé, on a posé la question sur les manières d'éviter les amorçages intempestifs d'un générateur d'ondes de choc dûs à l'influence de particules de poussière. Après un exposé des solutions fondamentales possibles de ce problème on a montré par un exemple concret comment les résultats désirés pouvaient être obtenus avec certitude avec des moyens relativement simples. Lorsque le générateur est conçu de manière à ce que les éclateurs puissent être amorcés au moyen d'un dispositif de déclenchement bien au-dessous de sa tension disruptive spontanée, il suffit d'alimenter les éclateurs avec un air partiellement dépoussiéré pour obtenir une large zone opérationnelle sans crainte d'amorçages intempestifs.

Es wird im Artikel die Frage gestellt, wie man verhindern kann, dass Staubpartikel zu Fehlzündungen eines Stoßspannungsgenerators führen. Nach einer Diskussion der grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten dieses Problems wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie man die gestellte Aufgabe mit verhältnismässig einfachen Mitteln sicher lösen kann: Wenn der Generator so konstruiert ist, dass man seine Schaltfunkenstrecken mit einer Auslösevorrichtung weit unterhalb ihrer natürlichen Ansprechspannung zünden kann, genügt es, die Funkenstrecken mit grob entstaubter Luft zu versorgen, um einen breiten, von Fehlzündungen freien Arbeitsbereich zu erhalten.

(Traduction)

1. Introduction

Les éclateurs de couplage représentent les éléments les plus critiques du couplage multiplicateur de Marx. Ils servent d'une part à la mise en série des condensateurs C_s chargés par l'intermédiaire des résistances R_L , R_e et R_s (fig. 1) au moment précis où la tension à leurs bornes a atteint une valeur déterminée; pour l'essai au choc d'appareils électriques, il est en effet très important que la valeur de crête de la tension appliquée à l'échantillon ne diffère de pas plus d'environ 1 % de la valeur prescrite. D'autre part, les éclateurs — composés généralement de sphères — ne sont pas des éléments absolument stables au point de vue de la tension d'amorçage. Cette instabilité est particulièrement sensible lorsque les éclateurs sont, comme dans le cas qui nous intéresse, sollicités par une tension continue. Les tensions d'amorçages indiquées par les tableaux d'étalonnage des spintermètres ne représentent que les valeurs supérieures limites de la tenue diélectrique pour les différents écartements considérés. Lorsque l'air ambiant contient des particules de poussière en suspension, les tensions disruptives peuvent atteindre des valeurs jusqu'à 30 % inférieures. Le mécanisme de ces décharges intempestives à basse tension a été étudié de façon approfondie par Schröder [1]¹⁾.

Comment éviter que la dispersion de la tension d'amorçage des éclateurs de couplage ne se répercute entièrement sur l'amplitude de l'onde de tension de choc produite par le générateur? Les lignes qui suivent mentionnent tout d'abord quelques possibilités de solution de ce problème puis décrivent un exemple d'application pratique.

2. L'amorçage spontané des éclateurs

Il est utile pour les observations qui vont suivre de revoir rapidement les recherches commentées dans un exposé an-

térieur [2] sur les phénomènes relatifs à l'amorçage dit spontané des éclateurs de couplage et de les discuter dans le cadre de la dispersion des tensions disruptives mentionnées plus haut.

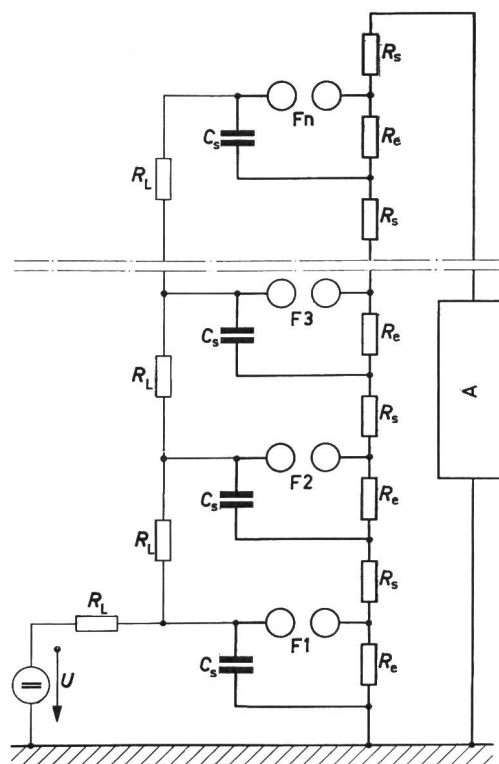


Fig. 1

Représentation schématique d'un couplage multiplicateur à n étages selon Marx

Arrangement des résistances suivant Edwards et Scoles: $R_L \gg R_e \gg R_s$; C_s condensateur de choc; F éclateur de couplage; R_e résistance de queue; R_L résistance de charge; R_s résistance de front; U tension de charge; A objet en essai

¹⁾ Voir bibliographie à la fin de l'article.

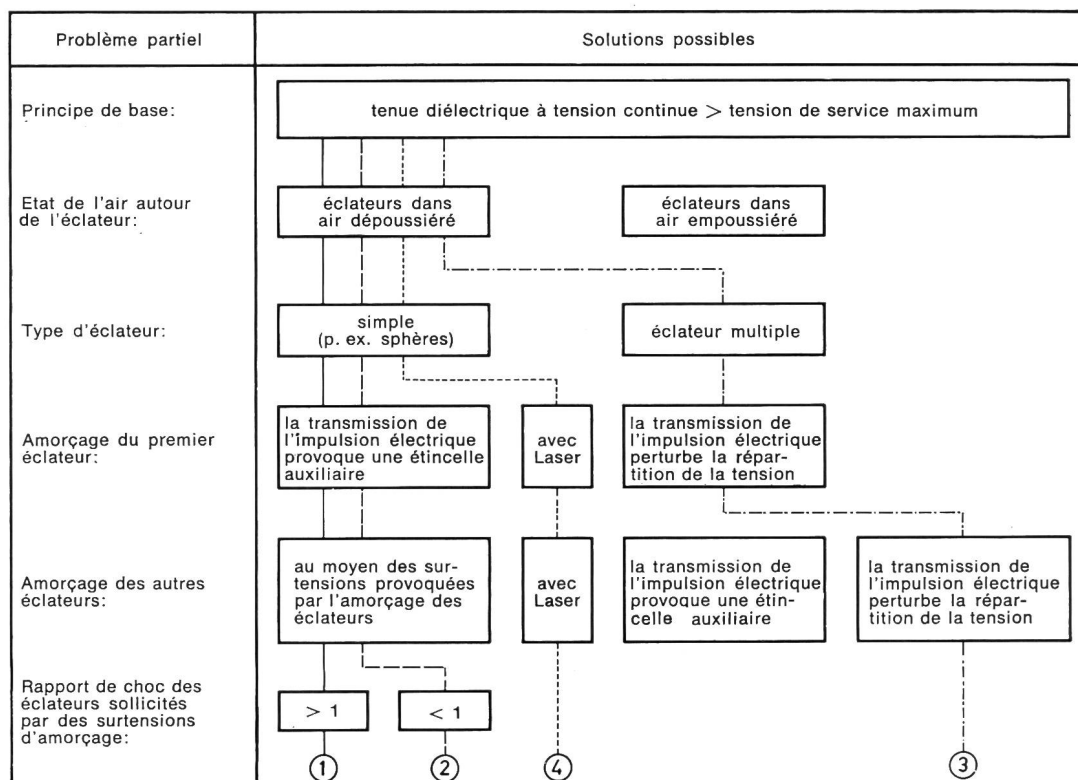


Fig. 2
Vue d'ensemble des possibilités de déclenchement précis de générateurs d'ondes de choc à une tension de charge affichée
Les variantes numérotées sont décrites dans les paragraphes indiqués ci-après: ① dans les paragraphes 3.1 et 4; ② dans le paragraphe 3.2; ③ et ④ dans le paragraphe 3.3

L'amorçage spontané des éclateurs de couplage se comprend ainsi: L'éclateur F1 du premier étage est ajusté de manière à ce que sa tension disruptive statique soit de quelques pourcents inférieure à celle des éclateurs F2, F3 etc. (fig. 1). Si l'on ne considère pas a priori la dispersion des tensions disruptives, F1 s'amorce par suite d'une élévation progressive de la tension de charge dès que sa tenue diélectrique statique sera dépassée. La chute de tension sur le premier éclateur provoque des surtensions telles sur les éclateurs supérieurs que F2 s'amorce également, entraînant à son tour de nouvelles surtensions, d'où l'amorçage de F3, etc.

L'amorçage des éclateurs ne débute pas forcément avec F1 mais peut être déclenché par un éclateur quelconque du générateur de choc. L'amplitude des surtensions est déterminée par les résistances R_e , R_L et R_s ainsi que par la capacité de fuite contre terre du générateur et les capacités de fuite entre étages.

Après l'amorçage du premier éclateur la valeur de la surtension qui en résulte sur l'éclateur suivant atteint en général 50...80 % de la tension de charge.

3. Possibilités de déclenchement précis

On a plusieurs possibilités pour rendre inopérante la dispersion de la tension disruptive. Toutes les variantes se basent sur le fait que la valeur de la tenue diélectrique en tension continue des éclateurs — ou d'une façon plus générale, des coupleurs — est choisie bien au-dessus de la tension continue maximale de fonctionnement. Lorsque la tension maximale de fonctionnement est plus faible que la limite inférieure de la valeur des décharges à basse tension le danger d'amorçages intempestifs dûs à des particules de poussière est éliminé.

Les arrangements décrits ci-après diffèrent principalement sur la manière dont les éclateurs peuvent être commandés de façon à remplir leur fonction de «coupleurs» malgré une tenue diélectrique plus élevée en tension continue.

La fig. 2 donne une idée des diverses solutions à ce problème. On peut faire les observations suivantes sur les nombreuses variantes proposées.

3.1 Générateur de choc avec éclateurs encapsulés et éclateur auxiliaire au premier étage

Si l'on fait amorcer le premier éclateur d'un générateur d'ondes de choc au moyen d'un éclateur auxiliaire au-dessous de sa tension disruptive nominale, les autres éclateurs s'amorceront également à cause des surtensions élevées. Ce mode de déclenchement fonctionne en général dans une plage de tension de charge s'élevant à 70...100 % de la valeur de la tension disruptive nominale, pour autant qu'on utilise des éclateurs simples à champ homogène, par ex. des sphères de couplage. Par contre, si les éclateurs sont placés dans une atmosphère très empoussiérée le premier éclateur peut, comme mentionné plus haut, s'amorcer à cause d'une particule de poussière à une tension s'élevant à env. 60 % seulement de sa tension disruptive nominale.

La fig. 3a donne les valeurs de la tension disruptive nominale, de la limite inférieure de déclenchement de tout le générateur au moyen d'impulsions auxiliaires et la limite inférieure des décharges à basse tension dans une atmosphère très polluée, en fonction de l'écartement des éclateurs de couplage.

Cette figure montre clairement le danger d'amorçages intempestifs dûs à des particules de poussière dans toute la zone de déclenchement du générateur comprise entre la tension disruptive nominale (courbe I) et la limite inférieure de déclenchement (courbe II) étant donné que la limite inférieure des décharges intempestives à basse tension (IIIa) se trouve située au-dessous de la limite de déclenchement.

Dans la zone située au-dessous de la limite de déclenchement et jusqu'à la limite des décharges à basse tension seuls quelques éclateurs s'amorcent, mais les surtensions résultantes

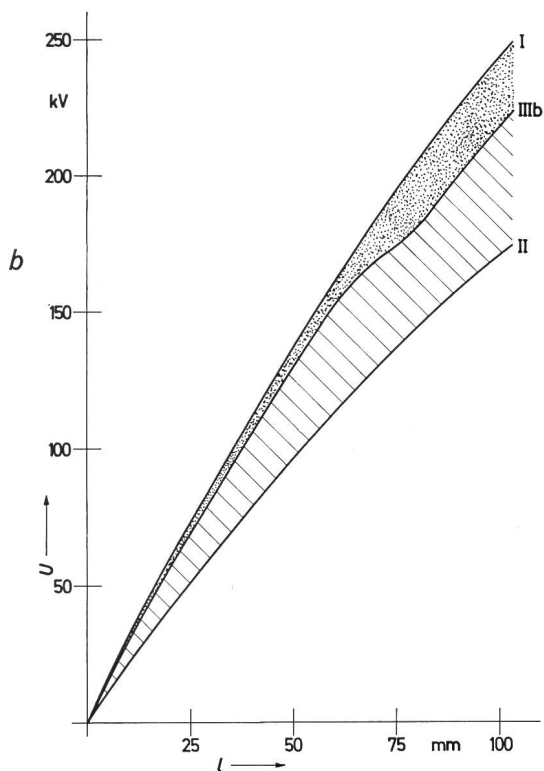
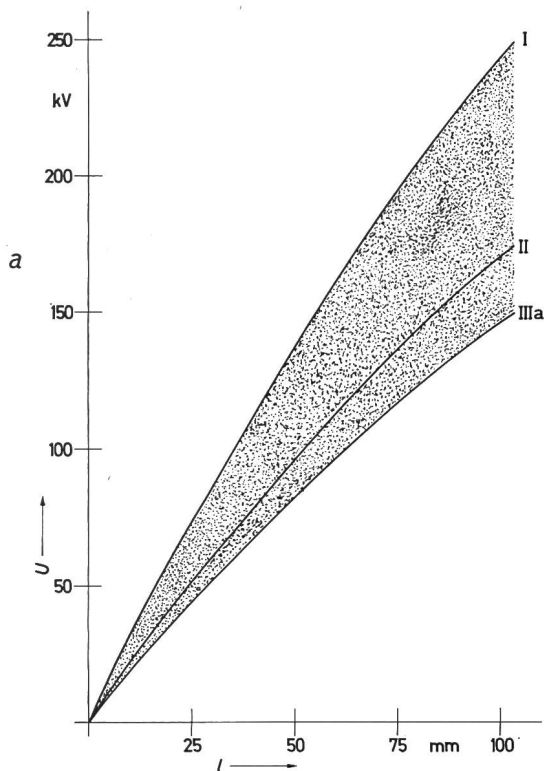


Fig. 3

Tension disruptive nominale (courbe I), limite de déclenchement (courbe II) et limite inférieure des amorçages à basse tension (courbe IIIa resp. IIIb) d'un générateur de choc avec 200 kV de tension de charge maximale. Les éclateurs de couplage (sphères de 25 cm de diamètre) se trouvent: a dans une atmosphère très empoussiérée; b dans une atmosphère dépoussiérée avec des particules de poussière de $2 \mu\text{m}$ au maximum. l écartement; U tension de charge.

ne suffisent pas à faire déclencher les autres éclateurs du générateur de choc.

La solution la plus simple du problème serait de faire fonctionner les éclateurs dans une atmosphère dépoussiérée.

Reste à savoir jusqu'à quelles limites on doit pousser le dépoussiérage. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec un filtre à poussière qui arrête toutes les particules ayant un grain de plus de $2 \mu\text{m}$ de diamètre. Les résultats des mesures effectuées avec le générateur de choc mentionné sous paragraphe 4 sont évalués dans la fig. 3b.

On remarque que les particules de poussière d'un diamètre inférieur à $2 \mu\text{m}$ qui passent à travers le filtre occasionnent une dispersion de la tension d'amorçage de 3...10 % seulement selon les écartements. La limite inférieure des décharges intempestives à basse tension (IIIb) se situe bien au-dessus de la limite de déclenchement (II) des éclateurs et il en résulte une plus large zone opérationnelle entre les courbes II et IIIb dans laquelle le générateur de choc peut fonctionner sans danger d'amorçages intempestifs. Grâce à cette plage de travail élargie l'écartement des éclateurs peut facilement être servo-commandé, cette commande étant liée étroitement avec la présélection de la tension de charge.

3.2 Eclateurs de couplage avec rapport de choc peu élevé

Les éclateurs simples à champ homogène considérés jusqu'ici ont le désavantage d'un «rapport de choc» supérieur à l'unité (fig. 4a). Par rapport de choc on entend, dans ce qui suit, le rapport de la tension de tenue au choc à la tension disruptive nominale à courant continu. La tenue diélectrique élevée des éclateurs simples est un élément défavorable dans les cas des surtensions qui doivent provoquer, comme déjà mentionné, l'allumage successif des éclateurs.

On peut en déduire que l'on devrait pouvoir abaisser la limite de déclenchement et élargir ainsi la zone opérationnelle du générateur de choc en utilisant une combinaison d'électrodes avec un rapport de choc inférieur à l'unité en lieu et place des simples sphères de couplage.

Une combinaison très simple ayant ces caractéristiques est constituée par un éclateur de couplage à sphères avec des tiges isolées à l'intérieur (fig. 4b). Les tiges sont reliées à la sphère au moyen d'une résistance à haute valeur ohmique. Avec de tels éclateurs on a obtenu depuis quelques années des résultats satisfaisants dans les parafoudres [3].

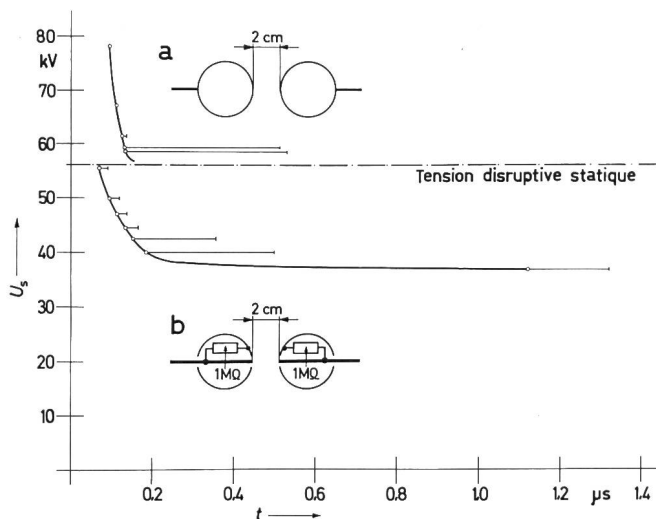


Fig. 4

Temps d'établissement et dispersion de la tension d'amorçage d'une sphère de 25 cm de diamètre (a) et d'une sphère avec tige-électrode incorporée (b). Irradiation très intense des deux éclateurs par l'arc d'armorage du générateur.

Forme d'onde: onde rectangulaire avec front de 60 ns. U_s tension de choc; t temps nécessaire à l'amorçage des éclateurs.

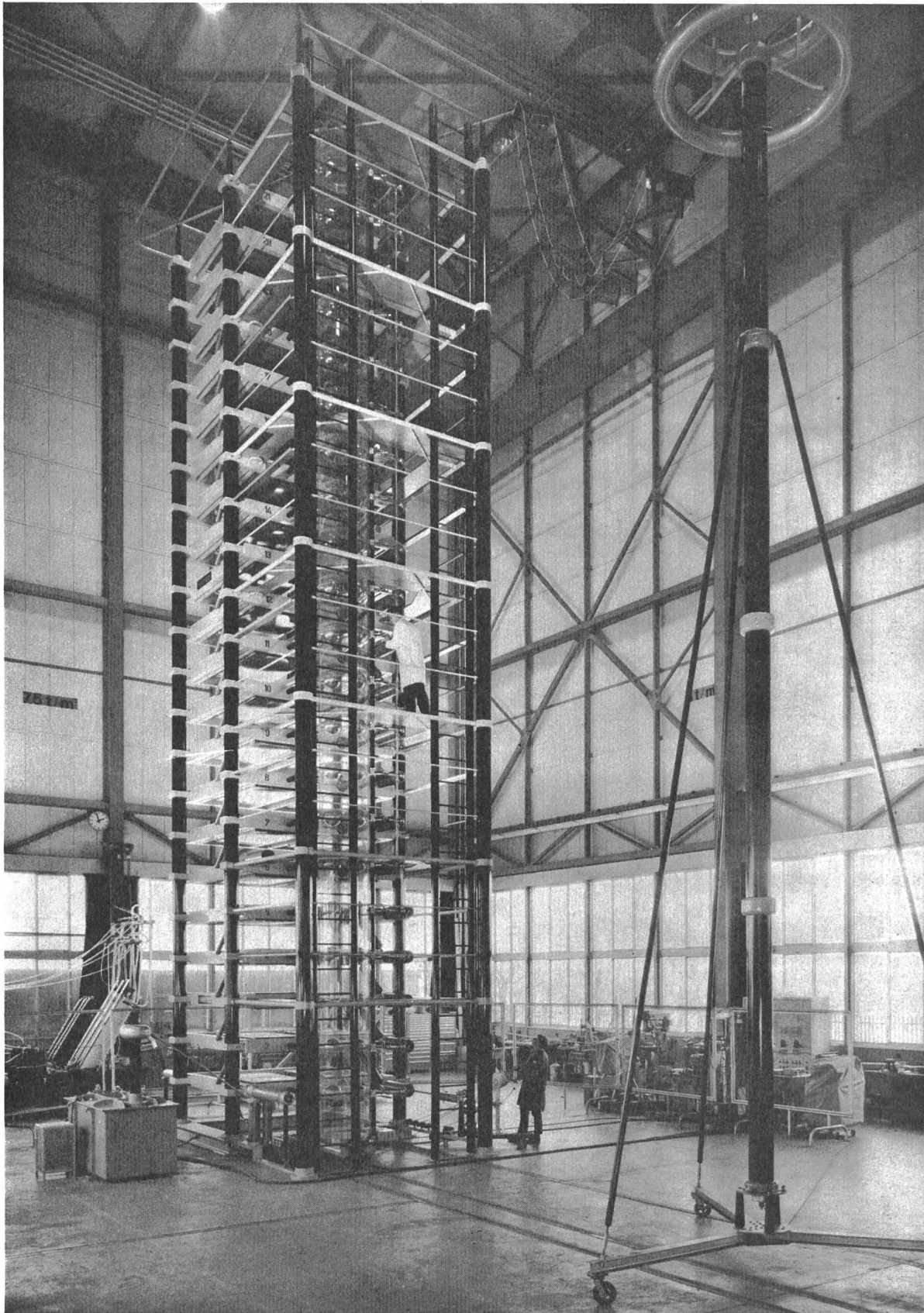


Fig. 5
Générateur d'ondes de choc 4,2 MV avec une énergie de 420 kW

Broadbent [4] a été le premier à utiliser de tels éclateurs comme éléments de couplage dans chaque étage du couplage multiplicateur de Marx et a obtenu ainsi un élargissement appréciable de la zone opérationnelle. Toutefois, l'idée de Broadbent d'incorporer des tiges dans les sphères

d'éclateurs partait de considérations différentes: Chacune des tiges isolées placées dans les sphères était reliée aux étages inférieurs au moyen de condensateurs de couplage. De cette manière, les impulsions auraient dû être dirigées sur les tiges et provoquer l'amorçage des éclateurs au moyen d'étincelles

auxiliaires. En variant la capacité de couplage, Broadbent constata que la zone opérationnelle du générateur de choc était la plus large lorsque l'on supprimait tout à fait les condensateurs de couplage. Cette découverte expérimentale s'explique par le fait que les condensateurs supplémentaires entraînent seulement une élévation de la capacité longitudinale du générateur de choc et qu'il en résulte une diminution de l'amplitude des surtensions nécessaires à l'allumage des éclateurs.

La cause de l'élargissement de la zone opérationnelle doit être recherchée uniquement dans la combinaison d'électrodes ayant un rapport de choc inférieur à l'unité.

3.3 Déclenchement artificiel de chaque éclateur de couplage

Au lieu du mécanisme spontané du couplage multiple selon Marx on peut aussi faire fonctionner chaque éclateur indépendamment au moyen d'un système de déclenchement individuel. Cela peut être réalisé par exemple par des impulsions électriques [5] ou encore avec un Laser [6]. Pour un déclenchement par impulsions électriques on doit dispo-

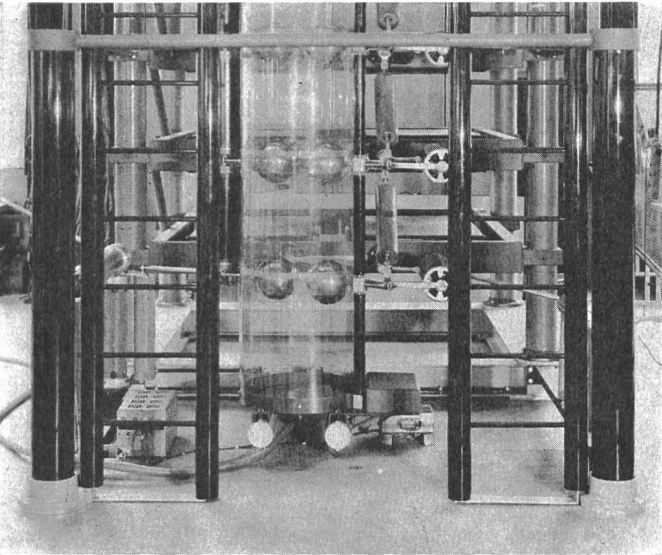


Fig. 6
Détails du générateur de la fig. 5

ser à chaque étage d'un générateur d'impulsions à haute tension déclenchable sur commande. L'amorçage par Laser requiert un montage des éclateurs très précis et, de plus, insensible aux vibrations; les difficultés en vue de l'obtention d'impulsion de déclenchement Laser de forte intensité sont encore grandes.

4. Un générateur d'ondes de choc 4,2 MV avec éclateurs encapsulés

Pour compléter ces considérations d'ordre général on trouvera ci-après en abrégé les résultats de mesures obtenues avec un gros générateur d'ondes de choc. Le générateur de la fig. 5 possède les caractéristiques suivantes:

tension de charge totale	4,2 MV
énergie	420 kW
nombre d'étages	21
capacité de choc	47,6 nF
tension de charge	200 kV

Le générateur est pourvu, tous les trois étages, d'une plate-forme de service fixée en permanence. Ces plate-formes sont accessibles au moyen d'échelles également fixes, en ma-

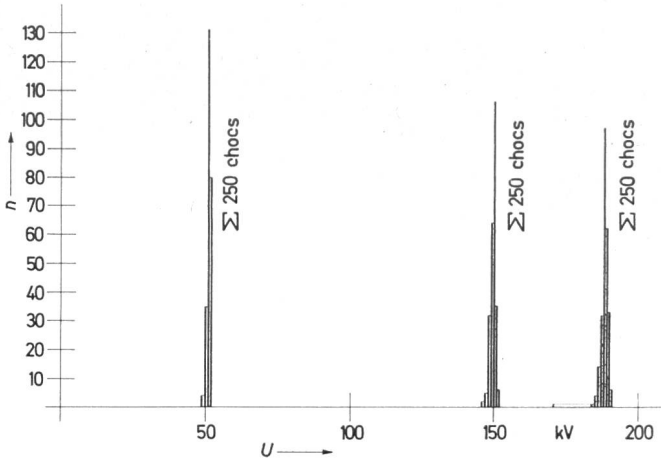


Fig. 7
Dispersion naturelle de la tension disruptive du générateur de la fig. 5
Eclateurs encapsulés avec dispositif d'alimentation en air dépoussiéré
n nombre d'amorçages; U tension de charge

tériel isolant. On peut ainsi effectuer tous les changements de couplage sur le générateur tels que mise des étages en parallèle ou changement de la forme d'onde sans l'aide d'un moyen de levage auxiliaire.

On a choisi pour le déclenchement du générateur la méthode simple décrite au paragraphe 3.1 avec seulement un éclateur auxiliaire au premier étage.

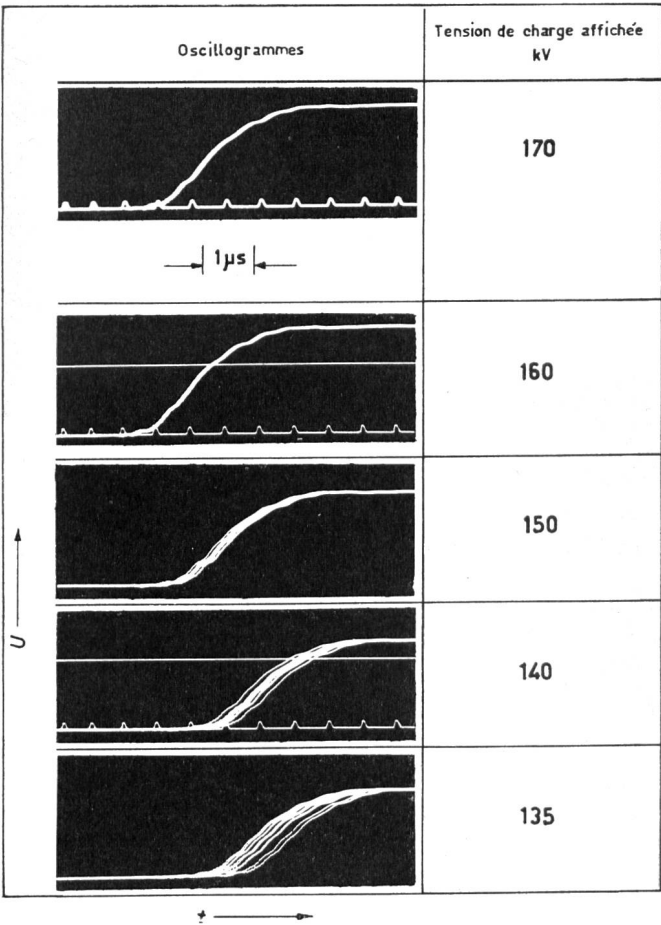


Fig. 8
Oscillogrammes donnant la dispersion temporelle de la tension fournie par le générateur d'ondes de choc $U = 4,2$ MV avec déclenchement par trigatron
Ecartement des éclateurs 73 mm correspondant à une tension disruptive de 191 kV
t temps

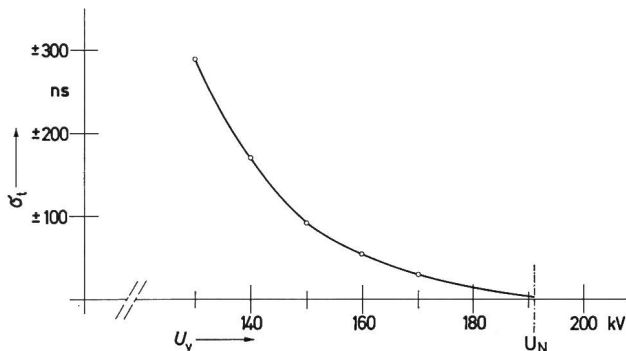


Fig. 9

La dispersion temporelle σ_t de la tension fournie par le générateur de choc 4,2 MV

Evaluation des oscillogrammes de la fig. 8

U_v tension de charge affichée; U_N tension nominale

La tension fournie par le redresseur de charge est comparée avec une tension de référence dans un dispositif de commande électronique, le trigatron. On affiche la valeur de la tension de charge en ajustant la tension de référence. Lorsque la tension de charge désirée est atteinte le trigatron envoie une impulsion de déclenchement au générateur de choc et une autre à l'oscillographe. Grâce à des lignes de retard le trigatron permet de déclencher l'oscillographe peu avant l'amorçage du générateur afin de permettre l'enregistrement intégral de la forme de l'onde de choc.

Les éclateurs sont placés dans une cheminée transparente en plexiglas de manière à ce que leur fonctionnement puisse être observé (fig. 6). La cheminée est reliée au réseau fournissant l'air comprimé dans l'usine par l'intermédiaire d'un assécheur d'air, d'un filtre à poussière et d'un détendeur. L'air sec et dépoussiéré est insufflé au pied de la cheminée, l'ouverture de sortie étant située au-dessus du dernier éclateur de couplage.

La dispersion de la tension disruptive du générateur en cas d'amorçage spontané de tous les éclateurs est un critère pour l'efficacité du dispositif d'encapsulation et du système à air comprimé. On a effectué par conséquent 250 chocs pour diverses tensions disruptives. La fig. 7 montre la distribution des amorçages. Par exemple, pour un écartement de 73 mm correspondant à une tension disruptive nominale de 191 kV la décharge intempestive la plus faible se situe vers 171 kV. Seule la distribution pour quelques écartements choisis est indiqué sur la fig. 7. La courbe complète mon-

trant la limite inférieure des décharges intempestives à basse tension pour le générateur de choc 4,2 MV est la courbe IIb dans la figure 3b.

Lors d'une autre série d'essais la limite inférieure de déclenchement possible a été déterminée au moyen d'un éclateur auxiliaire au premier étage du générateur. Dans ce but, le générateur et l'oscillographe ont été déclenchés automatiquement par le trigatron pour une valeur affichée de la tension de charge. L'écartement des éclateurs de couplage restant inchangé pour une série d'essais, la tension de charge présélectionnée fut diminuée par échelons. Ainsi, par exemple, pour un écartement de 73 mm correspondant à une tension disruptive nominale de 191 kV la tension de charge fut variée entre 180 kV et 135 kV et pour chaque échelon dix chocs successifs ont été enregistrés sur le même film (fig. 8).

On voit sur l'oscillogramme de la fig. 9 la dispersion temporelle en fonction de la tension de charge des chocs résultant du déclenchement automatique par le trigatron.

La zone opérationnelle dans laquelle le générateur peut opérer sans danger d'amorçages intempestifs se situe donc, pour un écartement des éclateurs de 73 mm, depuis 170 kV (limite des amorçages à basse tension) à 135 kV de tension de charge (limite de déclenchement).

Une série d'essais analogues avec d'autres écartements a permis de déterminer la limite de déclenchement inférieure II qui est donnée à nouveau dans la fig. 3b et pour laquelle on a admis comme dispersion temporelle des chocs la valeur de ± 300 ns. Si l'on n'admet qu'une valeur de ± 100 ns la limite de déclenchement se situe à des tensions de charge supérieures d'environ 10 %.

Bibliographie

- [1] G.-A. Schröder: Über den Entladungsmechanismus im Raumluft in einem homogenen Feld bei Elektrodenabständen von 2,5 bis 9 cm. Zeitschrift für angewandte Physik 13(1961), p. 367...375.
- [2] A. Rodewald: Untersuchungen über die Zündung der Schaltfunkenstrecken in der Marxchen Vervielfachungsschaltung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1966.
- [3] D. Müller-Hillebrand: Die neuzeitliche Entwicklung von Überspannungsschutzgeräten in Hochspannungsanlagen. ETZ 55(1934), p. 782...784.
- [4] T. E. Broadbent: New high-voltage multi-stage impulse generator circuit. Journal of scientific instruments 37(1960), p. 231...236.
- [5] Impulse under strict control. Electrical Review 182(1968), p. 256.
- [6] A. H. Guenther et J. R. Bettis: Laser-triggered megavolt switching. IEEE Journal of quantum electronics 3(1967), p. 581...588.

Adresse de l'auteur:

Dr.-Ing. A. Rodewald, Emil Haefely & Cie. AG, Case postale, 4000 Bâle 28.