Recherche sur les décharges superficielles longues

Autor(en): **Turkowski, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 15

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904991

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Recherches sur les décharges superficielles longues

W. Turkowski

537.523.4:621.316.98;

L'article présente les résultats des essais de décharges exécutés sur un modèle de traversée dans le but de reproduire et d'étudier les phénomènes de la foudre. Ils reposent sur plus de 850 décharges avec une distance d'éclatement de 3,5 m et des ondes de tension de choc des deux polarités de 1,2/50 à 500/2500.

Die Resultate von Entladungsversuchen an einem Durchführungsmodell werden beschrieben, die zur Darstellung und Untersuchung von Blitzentladungen durchgeführt wurden. Sie beruhen auf mehr als 850 Entladungen über eine Distanz von 3,5 m mit Spannungsstössen beider Polaritäten von 1,2/50 bis 500/2500.

1. Introduction

Depuis plus de dix ans, des décharges superficielles longues sont l'objet d'amples recherches dans le but de reproduire la foudre [1; 2]. Limité par la place disponible et la tension de choc applicable, *S. Szpor* avait proposé un modèle à traversée, dont l'aptitude à reproduire le mécanisme de la propagation discontinue des décharges superficielles a été confirmée dès les premiers travaux [3; . . . ; 6]. L'idée principale des travaux était de confirmer expérimentalement au laboratoire la théorie de la relaxation du développement d'un leader discontinu de la foudre [7].

Les phénomènes du leader et de l'antileader ainsi que l'influence de la tension du réseau sur le développement d'un leader descendant en vue des zones de protection sont expliqués dans [8; 9]. Lors des derniers travaux entrepris à Gdańsk [10], on a obtenu à des tensions de choc 1,2/50 le phénomène d'un leader discontinu d'environ 60 A et jusqu'à 3,5 m de longueur ayant une vitesse de propagation jusqu'à $3 \cdot 10^2$ cm/µs, ce qui correspond aux valeurs inférieures des leaders montants de la foudre [11; . . . ; 14]. L'écoulement continu du courant du leader avec des fluctuations modérées, sans atteindre ou même approcher zéro, constitue une confirmation expérimentale de la théorie de relaxation.

Afin d'arriver à des conclusions plus profondes sur les phénomènes de décharge, il faut analyser de près les grandeurs électriques et physiques enregistrées pour en trouver les correlations. Lors de l'étude des décharges entre phases dans les lignes de transport, on enregistrait en même temps les phénomènes électriques et lumineux du leader [15; 16]. Parmi les résultats des essais effectués aux Renardières [17; . . . ; 20] avec de longues décharges dans l'air à des chocs de manœuvre de polarité négative, on présente aussi des oscillogrammes des courants de décharge ainsi que des enregistrements des phénomènes lumineux du leader discontinu. Dès le départ, le Groupe des Renardières cherchait à déterminer la physique des décharges et lors de leurs derniers travaux [20], de plus, d'acquérir des données permettant de mieux modeler la foudre et de tirer des conclusions plus précises concernant les distances des décharges et la protection contre la foudre. Des études de décharges à des tensions de choc de polarité négative ont été entreprises également au Japon [21]. On y constate la ressemblance entre le canal lumineux suivant les streamers négatifs dans une décharge longue à chocs à front raide avec les leaders observés dans les décharges de la foudre. L'étude des phénomènes acoustiques de la foudre ainsi que des décharges obtenues au laboratoire est présentée dans [2]. Aux Renardières on a fait également des expériences dans ce domaine [20].

Les auteurs de [22] présentent des résultats généraux de l'étude des streamers et des leaders discontinus dans des décharges superficielles en forme de tracés de *Lichtenberg*. Les valeurs des tensions d'amorçage négatives obtenues sur un modèle 1 : 50 pour des décharges dans l'air libre de longueur de plus de 5 m diffèrent de celles présentées par *T. E. Allibone* dans la partie 7 de [2]. Suivant l'auteur de ce livre, on observe des anomalies dans les tensions d'amorçage pour les décharges superficielles, les valeurs de tensions de polarité négative étant inférieures à celles de polarité positive. Selon [22] les tensions d'amorçage correspondent aux décharges dans l'air libre, c'est-à-dire qu'elles sont inférieures pour les tensions positives.

Les études en laboratoire sur la simulation du phénomène de la foudre doivent tenir compte des observations faites en nature [1; 2; 11; 12; 14; 23; 24; 25]. La difficulté essentielle à laquelle on se heurte est l'impossibilité de représenter les distances naturelles ainsi que les paramètres électriques réels, surtout des courants et des charges. Les essais de laboratoire devraient être effectués à des tensions proches à celles qui apparaissent entre un nuage chargé et la terre [1; 2]. Les travaux préliminaires de Gdańsk [3; . . . ; 6] ont été effectués à l'aide d'un générateur ajusté à produire des chocs quasi rectangulaires. Les essais de laboratoire ne peuvent être que des essais de modèle. Ce n'est qu'après avoir reproduit les paramètres électriques essentiels, surtout le courant de la foudre, que les phénomènes physiques en fonction du temps et de la distance peuvent être rapportés aux phénomènes de la foudre naturelle.

2. Circuit d'essai et installations de laboratoire

Le circuit d'essai est présenté à la figure 1. L'électrode haute tension est formée d'une tige en aluminium tandis que l'électrode basse tension est une lame en feuille d'aluminium adhérant le long d'un tube isolant qui repose sur trois supports isolants. Des couches de minces feuilles de PVC constituent l'isolement solide entre les électrodes. L'électrode basse tension est mise à la terre à une des extrémités du tube isolant à travers une résistance série et le dispositif d'enregistrement du courant. Après l'application de la tension de choc à l'électrode haute tension touchant le diélectrique PVC juste au-dessus de l'extrémité libre de l'électrode basse tension, la décharge se propage dans l'air à la surface du diélectrique solide le long de l'électrode basse tension. Ce circuit permet d'obtenir des décharges de 3,5 m de longueur à une tension de choc appliquée de l'ordre de 200 kV. Dans les derniers essais, un générateur de choc 120 kJ, 1500 kV a été utilisé et la tension de choc a été mesu-

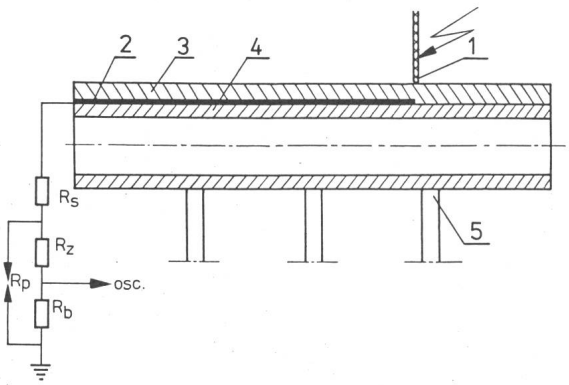

Fig. 1 Circuit d'essai et circuit d'enregistrement du courant du leader

1	électrode haute tension	R_s	résistance série
2	électrode basse tension	R_z	résistance de protection
3	diélectrique solide	R_b	shunt de mesure
4	tube isolant	R_p	éclateur de protection
5	support	osc	sortie vers l'oscillographe

rée par deux méthodes différentes, au moyen d'un diviseur de tension et d'un voltmètre de crête.

Le courant du leader est enregistré à l'extrémité du circuit mis à la terre. L'oscillographe est protégé contre les chutes de tension excessives accompagnant les courants d'amorçage par l'éclateur de protection R_p. Les décharges sont produites avec des résistances série de 50 à 500 Ω et de 2000 à 6000 Ω. Le shunt de mesure est construit en fil en constantan tressé bifilairement. On obtient un temps de réponse comparable à celui du diviseur résistance-capacité, soit environ 10 ns.

Le courant de leader de la décharge atteint la valeur de 60 A environ. La décharge est alimentée par le générateur de choc à travers l'électrode haute tension. La valeur du courant du côté générateur diffère légèrement de celle qu'on observe à l'extrémité basse tension, mais pas autant que dans les circuits à intervalles d'air sans couches en diélectrique solide. On remarque un fort couplage entre le canal de la décharge et l'électrode basse tension à travers la couche en diélectrique solide et l'air. Il existe également un faible courant de fuite dans l'air. En conclusion on peut admettre une représentation appropriée des phénomènes physiques du leader par le courant mesuré. Le courant du déplacement dans le diélectrique solide est un courant de polarisation qui dure entre 10^{-15} et 10^{-13} s et a un caractère purement capacitif ne causant pas de pertes en énergie [27]. Les tensions et les courants sont enregistrés à l'aide d'un oscillographe (type 72 D Haefely).

Les phénomènes lumineux de la décharge ont été photographiés avec un appareil à disque tournant équipé d'un objectif en verre. L'enregistrement s'est fait dans la plage de sensibilité à l'œil, de longueur d'onde entre 400 et 800 nm. Le disque tournant à une vitesse de 8330 t/min environ permettait d'étendre les phénomènes lumineux dans le temps jusqu'à 8,3 µs/mm.

3. Décharges produites par des chocs de manœuvre

Lors des chocs de manœuvre, la décharge se produit durant la montée rapide de 1,5 à 10 kV/µs de la partie initiale du front des impulsions. Les instruments utilisés ne permettaient pas d'enregistrer l'effet de couronne initial ni le phénomène de streamer (couronne de leader) à cause de l'émission d'un rayonnement ultraviolet pendant ces phases [19].

Le leader consiste en flèches lumineuses (gradins). Ces gradins sont séparés par des intervalles sombres de durée de 1 µs à plus d'une dizaine de µs. On observe plusieurs groupes de gradins, le plus souvent deux. Ces groupes de gradins sont séparés par des intervalles sombres d'une dizaine à une centaine de µs.

Durant le développement du leader on observe des flèches lumineuses de longueur inférieure à 100 cm d'intensité lumineuse relativement faible, dont la valeur de courant monte à quelques A et dont la densité d'énergie est inférieure à 10 J/m. Une si faible énergie ne peut chauffer suffisamment le gaz pour former un canal à plasma [19]. On désigne alors les flèches comme des streamers séparés. Les figures 2, 3 et 4 représentent des exemples d'enregistrement des phénomènes. Les paramètres des décharges superficielles en cas de chocs de manœuvre y sont indiqués. Ces figures permettent aussi de comparer les phénomènes lumineux des décharges avec les oscillogrammes correspondants de la tension et du courant. Dans tous les cas il y a une conformité du temps des impulsions du courant et des flèches lumineuses du leader. On le voit plus clairement en dessinant les gradins du leader en agrandissement. La longueur des gradins a été enregistrée à l'aide d'un appareil photographique et les charges et le temps du développement respectifs ont été déterminés à partir des oscillogrammes du courant. Ces données permettaient de calculer la vitesse de propagation, les charges et l'énergie des gradins et du leader entier, déterminant de cette façon le développement de la décharge préliminaire.

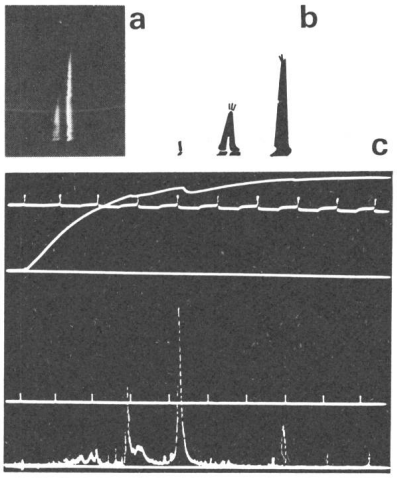

Fig. 2 Enregistrement du leader saccadé pour une tension de choc 250/2500 µs de polarité positive

U_{max} = 210 kV; R_s = 198 Ω; t = 23,4 °C; p = 1,02 bar, humidité 8,4 g/m³.

a Photo du leader. Longueurs des gradins: l_1 = 33,3 cm, l_2 = 130 cm, l_3 = 266 cm; 1 mm ≈ 17,5 µs

b Phénomènes de la décharge, en agrandissement

c Oscillogrammes. Tension (courbe supérieure); courant (courbe inférieure). I_{1max} = 2,31 A, I_{2max} = 9,14 A, I_{3max} = 17,6 A; 25 µs/div.

Gradient de tension: premier gradin 3,86 kV/cm, troisième gradin 0,625 kV/cm. Charge: 233 µC.

Energie: 32,6 J. Vitesse de développement: premier gradin 1,96 cm/µs, trosième gradin 26,6 cm/µs, leader 2,68 cm/µs.

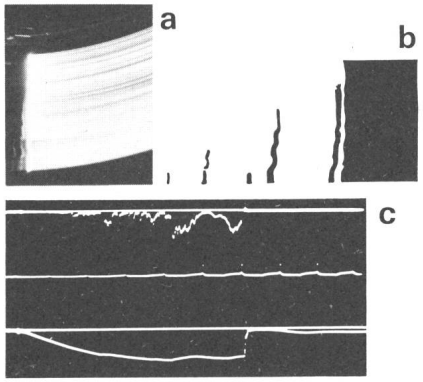

Fig. 3 Enregistrement du leader constitué de deux groupes de gradins et de l'amorçage pour tension de choc 100/2500 de polarité négative

$U_{max} = -188$ kV/220 kV; $R_s = 183{,}2\ \Omega$; $t = 19$ °C, $p = 1{,}005$ bar, humidité 5,9 g/m³.

a Photo de la décharge. Longueurs des gradins: $l_{11} = 33{,}3$ cm, $l_{12} = 94{,}0$ cm, $l_{21} = 33{,}3$ cm, $l_{22} = 211{,}0$ cm, $l_{23} = 266{,}0$ cm; l mm ≈ 17,5 µs

b Phénomènes de la décharge en agrandissement

c Oscillogrammes. Tension (courbe inférieure); courant (courbe supérieure)
$I_{11max} = 4{,}62$ A, $I_{12} = 13{,}8$ A, $I_{21} = 9{,}23$ A, $I_{22} = 16{,}8$ A, $I_{23} = 14{,}3$ A; 10 µs/div.

Gradient de tension: premier gradin du premier groupe 4,8 kV/cm, troisième gradin du deuxième groupe 0,697 kV/cm. Charge: 371 µC.

Energie: 52 J. Vitesse de développement: premier gradin du premier groupe 19 cm/µs, troisième gradin du deuxième groupe 66,4 cm/µs, leader 5,8 cm/µs.

La figure 2 représente le phénomène d'un leader coupé (arrêté) avec choc positif. Le leader d'une longueur de 270 cm environ s'est développé en trois gradins uniformes. Les valeurs des charges et les maximums du courant croissent de la même manière. Entre les gradins, le courant tombe à ou s'approche de zéro. Après l'extinction de la luminosité enregistrée, on observe quelques impulsions du courant mais accompagnées de charges beaucoup plus faibles que les précédentes. Le premier gradin d'environ 30 cm se caractérise par une faible intensité lumineuse, une petite charge unitaire et une énergie unitaire bien au-dessous de 10 J/m. C'est ce qu'on appelle un streamer isolé. Cependant, la vitesse de sa propagation est considérable. Le second gradin est constitué par deux flèches superposées. L'oscillogramme du courant montre un gradin distinct qui illustre l'amenée d'une charge supplémentaire à la décharge. Le troisième gradin prend la forme d'un canal à plasma qui suit le tracé des deux gradins précédents. Il se caractérise par la plus grande vitesse de propagation et le moindre gradient de la tension. Dans [17; 25] on constate aussi une intensité lumineuse des streamers bien plus faible que celle des canaux à plasma (leaders). Lors des intervalles obscures de 20 à 25 µs entre les gradins le courant tombe pratiquement à zéro.

La figure 3 représente un leader précédant la décharge principale pour un choc négatif. Il est constitué de deux groupes de gradins. Le premier groupe à deux gradins et le premier gradin du second groupe sont des streamers isolés. Les deux gradins précédant la décharge principale sont des canaux à plasma de grandes charges et énergies et de longueurs de 200 à 270 cm. La zone lumineuse du dernier gradin se perd dans la luminosité de la décharge principale.

La figure 4 représente un leader constitué de cinq gradins uniformes. L'oscillogramme du courant est continu avec des maximums nombreux. La charge afflue continuellement à la zone de la décharche, même pendant les intervalles sombres. Le premier gradin de 65 cm environ à faibles courant, charge et énergie se développe comme streamer isolé. Les gradins suivants ont une intensité lumineuse supérieure. Le dernier, de 315 cm, caractérisé d'un courant, d'une charge et d'une énergie importantes est précédé d'une chute du courant et d'une ionisation ralentie dans la zone libre de 30 cm pendant l'intervalle sombre de 6 µs avant la décharge principale. C'est l'exemple le plus intéressant d'un leader à plusieurs gradins.

On peut s'attendre à ce qu'il soit possible de simuler au laboratoire le leader discontinu de la foudre à l'aide des leaders de longueurs bien supérieures, notamment, jusqu'à 50 m. En étudiant les phénomènes élémentaires à l'aide d'un appareillage moderne, il sera sans doute possible d'expliquer avec une précision bien supérieure le phénomène du développement d'un leader discontinu de la foudre.

3.1 Comparaison avec des décharges longues en l'air

Dans les études internationales effectuées aux Renardières concernant des décharges longues à des tensions de manœuvre, on présente les résultats sous la forme des paramètres de décharges représentant, par conséquent, les phénomènes à une échelle macro [17; 18; 19; 20]. Ces paramètres ont également été déterminés à Gdańsk pour les chocs positifs de manœuvre [10]. Le tableau I compare les valeurs des paramètres du leader des décharges superficielles obtenues à Gdańsk avec celles du leader des décharges dans l'air libre déterminées aux Renardières pour des chocs de polarité positive [19].

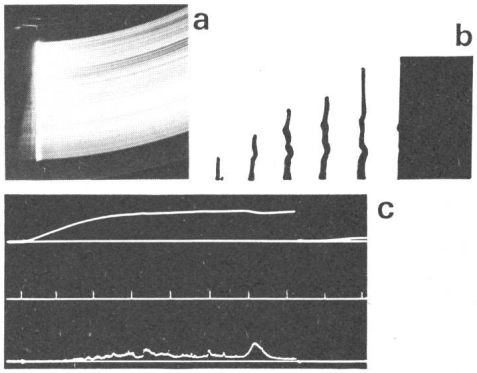

Fig. 4 Enregistrement du leader et de l'amorçage pour une tension de choc 100/2500 de polarité positive

$U_{max} = 207$ kV/230 kV, $R_s = 541{,}1\ \Omega$, $t = 22{,}2$ °C, $p = 1{,}02$ bar, humidité 5,4 g/m³.

a Photo de la décharge. Longueur des gradins: $l_1 = 65{,}4$ cm, $l_2 = 120$ cm, $l_3 = 196{,}0$ cm, $l_4 = 228{,}0$ cm, $l_5 = 315{,}0$ cm, 1 mm ≈ 17,5 µs

b Phénomènes de la décharge en agrandissement

c Oscillogrammes. Tension (courbe supérieure), courant (courbe inférieure): $I_{1max} = 4{,}5$ A, $I_{2max} = 6{,}3$ A, $I_{3max} = 7{,}2$ A, $I_{4max} = 6{,}0$ A, $I_{5max} = 10{,}8$ A; 10 µs/div.

Le leader s'est développé en cinq gradins réguliers.

Gradient de tension: premier gradin 2,26 kV/cm, cinquième gradin 0,623 kV/cm. Charge: 301 µC.

Energie: 45 J. Vitesse de développement: premier gradin 16,4 cm/µs, cinquième: 52,4 cm/µs, leader 5,16 cm/µs.

Tableau I

	Gdańsk	Les Renardières
Courant	max. env. 40 A	moyen 1-3 A
Vitesse de propagation	1,9-5,1 cm/μs	1,4-2 cm/μs
Charge unitaire	0,5-2,1 μC/cm	0,2-0,5 μC/cm
Energie unitaire	8,5-33 J/m	25-30 J/m

La différence essentielle réside dans la valeur du courant du leader. Dans les systèmes à traversée, les conditions sont plus propices pour produire un leader à grand courant. Les vitesses supérieures du développement des décharges superficielles en sont la conséquence. Aussi apparaissent des valeurs supérieures de la charge unitaire portée par le leader d'une décharge superficielle. Les valeurs inférieures de l'énergie unitaire du leader de la décharge superficielle peuvent être expliquées par les valeurs de tension beaucoup plus élevées dans une décharge dans l'air libre tandis que les distances ne sont que quelques fois plus grandes.

3.2 Amorçages multiples

Des amorçages multiples dans une même décharge ont été constatées pour des chocs de manœuvre 250/2500 et 500/2500 des deux polarités. On a observé deux types d'amorçages multiples:

Type a: au moment du rétablissement de la tension au niveau de 80% de la valeur de la tension du premier amorçage;

Type b: au moment du rétablissement de la tension au niveau de 20 à 40% de la valeur de la tension du premier amorçage suivi d'une phase oscillatoire de la tension.

Les phénomènes lumineux et les courbes de la tension et de courant enregistrés sont présentés dans les figures 5 et 6. Dans les conditions naturelles, il existe deux types de foudre nommés suivant *Kitagawa:* «discrete flash» et «hybrid flash» [13]. La foudre du type «discrete flash» est composée de quelques décharges séparées qui donnent des impulsions lumineuses de courte durée accompagnées d'impulsions du courant. La foudre du type «hybrid flash» est composée de nombreuses décharges dont les impulsions lumineuses sont superposées.

Le type «a» de la décharge superficielle à décharges principales répétées a des caractéristiques ressemblant à celles de la foudre naturelle du type «discrete flash» et le type «b» - du type «hybrid flash». Les phénomènes de la foudre multiple ainsi que des décharges de laboratoire à décharges principales répétées ne sont pas bien expliqués. Pour le type «a» on peut supposer le déchargement de la capacité du front du générateur à travers le canal de la décharge principale et de violents phénomènes de déionisation accompagnés d'intervalles sombres. Puis après le rechargement de la capacité de front, le développement des décharges préliminaire et principale est répété. Après le troisième accroissement de la tension, la distance d'amorçage est déjà déionisée à un point rendant le développement de la décharge impossible.

Pour le type «b» de décharge principale multiple la disparition rapide de la décharge principale n'est pas accompagnée de l'extinction de la luminosité et d'un déchargement total de la capacité de front; elle est suivie de chutes de tension oscillatoires répétées durant les décharges principales jusqu'au déchargement de la source, c'est-à-dire de la capacité principale du générateur.

La connaissance des deux types de décharges au laboratoire a une valeur pratique essentielle car le pourcentage des décharges multiples de la foudre est haut [23].

3.3 Intervalles sombres de la trajectoire de la décharge

Des intervalles sombres et une luminosité non uniforme apparaissent dans une décharge superficielle longue tout le long de la trajectoire de l'amorçage principal et du leader. Ces phénomènes sont visibles dans la figure 7. Les phénomènes liés à la luminosité de la décharge n'ont pas encore été complètement éclaircis.

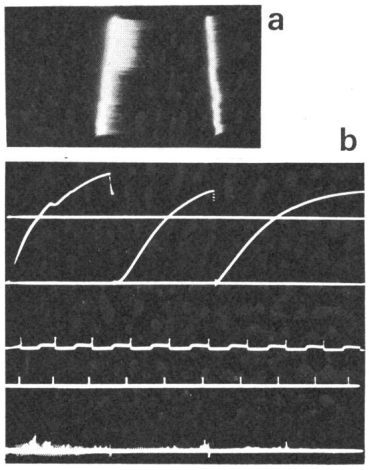

Fig. 5 Amorçage multiple pour tension de choc de forme 500/2500, polarité positive, type a

a Phénomènes lumineux

b Oscillogrammes. Tension (courbe supérieure), courant (courbe inférieure)

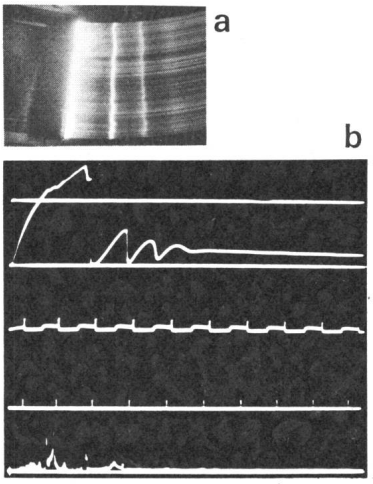

Fig. 6 Amorçage multiple pour tension de choc de forme 500/2500, polarité positive, type b

a Phénomènes lumineux

b Oscillogrammes. Tension (courbe supérieure), courant (courbe inférieure)

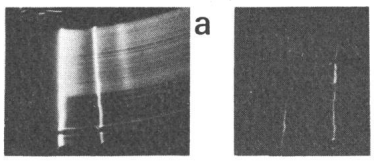

Fig. 7 Discontinuités et irrégularités de la luminosité le long de la trajectoire pour une tension de choc 500/2500, polarité négative
a Flèches du leader
b Amorçage

On a souvent observé des micro-discontinuités sous forme de petits points lumineux à des intervalles de 1,5 à 3 cm [6]. Lors du développement de la couronne préliminaire (first corona), il y a des pauses de luminosité qui accompagnent l'écoulement continu par impulsions du courant pendant toute la durée du phénomène de 100–200 ns [19; 26]. L'explication du phénomène par le chauffage du gaz pendant l'intervalle sombre semble être une simplification du problème [26]. L'abondance des phénomènes lumineux dans l'espace d'amorçage est présentée dans les travaux [2; 16; 20] et de ceux accompagnant le leader de la foudre dans [13].

Paramètres typiques de l'amorçage pour leader saccadé en cas de choc de foudre 1,3/50 Tableau II

Ordre de l'essai	Polarité et valeur de crête de la tension d'amorçage	Résistance série totale	Courant max. du leader	Longueur du leader	Densité de charge du leader	Densité d'énergie du leader	Vitesse de propagation du leader
	kV	Ω	A	cm	µC/cm	J/m	cm/µs
1	-147,0	64,6	55	250	0,482	6,84	67,5
2	+186,0	64,6	65,2	300	1,02	17,2	21,8
3	-155,0	541,1	38,0	281	0,434	6,12	46
4	+193,5	541,1	39,3	290	1,22	20,8	16
5	-218,0	6143	21,0	300	0,322	3,57	52,6
6	+235,0	6143	20,3	312	0,7	10,2	10,4

Paramètres typiques de l'amorçage pour chocs de manœuvre 100/2500, 250/2500, 500/2500 Tableau III

Ordre de l'essai	Polarité et valeur de crête de la tension d'amorçage. Entre paranthèses valeur prévue	Résistance série totale	Courant max. du leader	Longueur du leader	Densité de charge du leader	Densité d'énergie du leader	Vitesse de propagation du leader
	kV	Ω	A	cm	µC/cm	J/m	cm/µs
I.1	-188 (-220)	183,2	16,8	266	1,46	19,5	5,22
I.2	+210 (+235)	79,5	39,6	297	1,56	25	3,8
I.3	-195 (-235)	541,1	37,9	253	1,02	12,5	7,22
I.4	+207 (+230)	541,1	10,9	315	0,95	19,5	5,16
II.1	-180 (-245)	198	16,4	200	1,29	16,05	2,6
II.2	+216 (+237)	198	31,0	278	1,55	20,2	1,92
II.3	-207 (-273)	6143	10,6	270	0,568	7,96	4,32
II.4	+206 (+254)	6143	4,84	319	0,566	8,5	4,23
III.1	-206 (-230)	79,5	9,45	208	0,504	7,56	0,905
III.2	+202,6 (+243)	79,5	15,5	302	0,868	12,2	1,73
III.3	-213,2 (-243)	556	3,2	202	0,435	5,82	1,1
III.4	+210 (+240)	556	5,3	286	0,772	10,4	1,17

I: 100/2500; II: 250/2500; III: 500/2500

Les phénomènes de décharge (écoulement du courant électrique donc des charges) dans le gaz sont identifiés avec les phénomènes lumineux qui accompagnent cet écoulement. Ces phénomènes lumineux dépendant aussi de la tension dans la zone de la décharge. D'antre part, les phénomènes élémentaires dans les atomes sont de très courte durée. Le temps d'ionisation par exemple, ne dure que 10^{-15} s [28] et le temps d'émission d'un photon est semblable.

L'étude des décharges en séparant le phénomène de l'écoulement du courant des phénomènes lumineux, ainsi que la détermination de l'influence de la tension demandent de pénétrer aux phénomènes élémentaires à l'aide d'un appareillage plus sophistiqué que celui utilisé jusqu'à présent. C'est pourquoi l'explication précise des phénomènes élémentaires dans le gaz lors d'une décharge, pendant les pauses périodiques de la luminosité est encore impossible.

4. Anomalies de la tension d'amorçage

Quelques valeurs d'essais de la tension d'amorçage de la décharge en fonction de la résistance série totale ainsi que des paramètres du leader saccadé sont donnés dans les tableaux II et III pour le circuit étudié.

La tension d'amorçage est supérieure pour les impulsions positives à celle pour les impulsions négatives, les résistances série étant les mêmes. Cette différence atteint 10 à 25% pour les chocs de foudre 1,2/50 et 7 à 20% pour les chocs de manœuvre avec temps de front de 100 à 250 μs et une résistance série de 50 à 550 Ω. On constate, de plus, que les valeurs prévues de la tension d'amorçage sont supérieures pour les chocs de manœuvre aux valeurs minimales pour les chocs de foudre, ceci pour les mêmes résistances. Des valeurs inférieures de la tension d'amorçage entraînent des valeurs plus élevées de la vitesse de croissance du leader.

L'explication des anomalies des tensions d'amorçage à partir de l'analyse des phénomènes élémentaires n'est pas possible à présent. On peut supposer qu'il y a une influence du diélectrique solide sur la décharge qui serait due aux gradients du champ électrique élevés et à l'action du canal de la décharge sur ce diélectrique. On a constaté ailleurs une valeur minimale de la tension d'amorçage à des tensions négatives sur un isolateur conique en polyméthyle metacrylate (plexiglass) à des pression de 10^{-3} à 10^{-4} Pa [29]. L'explication de ce phénomène y suggère l'influence de l'émission secondaire d'électrons de la surface de l'isolateur. Un seul électron émis peut causer une avalanche; par conséquent, l'impédance est réduite et la tension d'amorçage tombe. Par contre, à des tensions positives, les conditions ne sont pas favorables à la formation des avalanches, car les électrons sont repoussés de la surface de l'isolateur.

5. Perspectives

Dans le modèle à traversée, la valeur de la tension d'amorçage d'une distance de 3,5 m monte à environ 200 kV. Elle est plusieurs fois inférieure à celle dans l'air libre qui monte pour 3,5 m à 1000 kV pour des chocs de manœuvre de polarité positive, à 2500 kV en polarité négative, à 1700 kV pour des chocs 1,2/50 positifs et à 2700 kV en polarité négative.

Le modèle à traversée rend donc possible la génération de décharges superficielles extra-longues de 50 m et plus. La valeur de la tension d'amorçage peut alors atteindre 1000 à 1500 kV suivant les possibilités techniques de construire une couche convenable en diélectrique solide. La génération des décharges extra-longues dans l'air libre exigerait l'application de générateurs au-dessus de 10 MV [7; 19; 20].

Par des décharges superficielles extra-longues on pourra modeler la foudre et étudier des phénomènes électrophysiques concernant:

- la décharge principale en alimentant le canal d'un générateur supplémentaire de courant,
- des décharges principales multiples,
- le développement des décharges descendantes et montantes en appliquant des tensions des deux côtés du système à traversée.

Bibliographie

[1] *S. Szpor:* Protection contre la foudre. Second édition. Varsovie, Wyd. Naukowo-Techniczne, 1973, (en polonais).

[2] *R. H. Golde:* Lightning. Vol I: Physics of Lightning. London/New York/San Francisco, Academic Press, 1977.

[3] *W. Turkowski:* Recherches sur les décharges superficielles longues dans les conditions analogues à celles de la foudre. Thèse de l'Ecole Polytechnique Gdansk, 1967.

[4] *S. Szpor* and *W. Turkowski:* Laboratory corroboration of the relaxation theory of the lightning stopped leader. Archiwum Elektrotechniki 17 (1968)2, p. 405...407.

[5] *A. Gadon:* Recherches sur les décharges superficielles longues dans les conditions analogues à celles de la foudre. Thèse de l'Ecole Polytechnique Gdansk, 1969, (en polonais).

[6] *S. Szpor* et *A. Gadon:* Confirmation en laboratoire de la théorie de relaxation du leader discontinu de la foudre. II. Archiwum Elektrotechniki 21(1972)2, p. 247...260.

[7] *S. Szpor:* Théorie de relaxation du leader saccadé de la foudre. Bull. ASE/UCS 68(1977)24, p. 1293...1296.

[8] *S. Szpor:* Lightning protective zones. IEEE Summer Power Meeting, July 16...21, 1978, Los Angeles/California; Paper No. 78 513-4.

[9] *S. Szpor:* Influence de la tension de service sur la zone de protection du conducteur de garde. Bull. ASE/UCS 71(1980)9, p. 465...468.

[10] *W. Turkowski:* Recherches sur les décharges superficielles longues. Archiwum Elektrotechniki 30(1981)1, p. 279...296 (en polonais).

[11] *K. B. McEachron:* Lightning to the Empire State Building. Journal of the Franklin Institute 227(1939)2, p. 149...217.

[12] *J. G. Hagenguth* and *J. G. Anderson:* Lightning to Empire State Building. AIEE Trans. Part III: PAS 71(1952)1, p. 641...649.

[13] *K. Berger:* The earth flash. In: R. H. Golde: Lightning. Vol. I. Physics of Lightning. London/New York/San Francisco, Academic Press, 1977; p. 119...190.

[14] *B. F. J. Schonland, D. J. Malan* and *H. Collens:* Progressive lightning. II. Proceedings of the Royal Society of London, series A: Mathematical and Physical Sciences 152(1935)877, p. 595...625.

[15] *R. Kosztaluk* a. o.: Effect of time shift between the two voltage components on phase-to-phase insulation strength. IEEE Trans. PAS 100(1981)7, p. 3379...3386.

[16] *R. Kosztaluk* a. o.: Mesures des paramètres électriques et optiques des décharges interphases. Conférence Canadienne sur les Communications et l'Energie, Oct. 15...17, 1980, Montreal; Rapport CAT No. 80 CH 1583-4, p. 146...149.

[17] Recherches aux Renardières sur l'amorçage de grands intervalles d'air. Electra -(1972)23, p. 53...157.

[18] Recherches sur l'amorçage de grands intervalles d'air aux Renardières. Résultats de 1973. Electra -(1974)35, p. 49...156.

[19] L'amorçage en polarité positive des grands intervalles d'air aux Renardières. Résultats de 1975 et conclusions. Electra -(1977)53, p. 31...153.

[20] L'amorçage en polarité négative des grands intervalles d'air aux Renardières. Résultats de 1978. Electra -(1981)74, p. 67...220.

[21] *T. Suzuki:* Breakdown process in rod-to-plane gaps with negative switching impulses. IEEE Trans. PAS 94(1975)4, p. 1381...1389.

[22] *M. Crucius* und *H. Winkelnkemper:* Gleitfunken als Analogiemodell langer Funken in Luft. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, 9...13. 9. 1975, Zürich. Zürich, SEV, 1975; Band 2, Bericht 4.4-04, p. 499...503.

[23] *R. B. Anderson* et *A. J. Eriksson:* Les paramètres de la foudre en vue des applications industrielles. Electra -(1980)69, p. 65...102.

[24] *R. Cortina* e. a.: Quelques aspects de l'évaluation des performances des réseaux électriques vis-à-vis de la foudre. Rapport CIGRE No. 33-13, 1980.

[25] *I. S. Stiekolnikow:* Nature de décharge longue. Moscou, Academie des Sciences USSR, 1960, (en russe).

[26] *I. Gallimberti:* The characteristics of the leader channel in long sparks. World Electrotechnical Congress, june 21...25, 1977, Moscow; ref. 2-22.

[27] *N. A. Babikow, N. S. Komarow* et *A. S. Siergiejew:* Technique haute tension. Varsovie, Wyd. Naukowo Techniczne, 1967, (en polonais).

[28] *J. H. D. Eland:* Photoelectron spectroscopy. London, Butterworth, 1974.

[29] *R. A. Anderson:* Study of surface flashover of conical insulators using 3ns rise time pulses. Seventh International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vaccum, Novosibirsk/USSR; august 1976.

Adresse de l'auteur:

Wojciech *Turkowski,* Institut de Recherches Nucléaires, Z.XXIV-05-400 Swierk-Otwock, Pologne.