

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	71 (1980)
<b>Heft:</b>	9
<b>Artikel:</b>	Influence de la tension de service sur la zone de protection du conducteur de garde
<b>Autor:</b>	Szpor, S.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-905250">https://doi.org/10.5169/seals-905250</a>

#### 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:** 28.01.2026

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

# Influence de la tension de service sur la zone de protection du conducteur de garde

Par S. Szpor

621.315.1

Les prescriptions relatives à l'angle de protection  $\alpha$  dans les paratonnerres et les lignes de transport diffèrent beaucoup. Le rapport de la tension de service à la tension du leader descendant qui entre en jeu est évalué. La philosophie géométrique appliquée à différentes conditions conduit à une large gamme de valeurs  $\alpha$ . Des études aux laboratoires et dans la nature sont donc nécessaires.

Die Vorschriften für den Schutzwinkel  $\alpha$  von Gebäuden und von Freileitungen weichen stark ab. Das Verhältnis der Betriebsspannung zur Spannung der Abwärts-Vorentladung ist bei Freileitungen wichtig und wird berechnet. Die geometrische Betrachtungsweise führt zu einem weiten Bereich von  $\alpha$ . Studien in Laboratorien und in der Natur sind deshalb notwendig.

## 1. Introduction

Vers 1930 on a reconnu que le conducteur de garde peut bien protéger une ligne de transport contre les surtensions atmosphériques directes, si trois conditions sont remplies: une zone de protection adéquate, l'élimination des amorçages inverses sur les pylônes et l'élimination des amorçages inverses au milieu de la portée. De nombreux calculs de la fréquence des déclenchements de lignes de transport ont été menés et ont donné un accord satisfaisant avec les résultats d'exploitation. Une exception étonnante est survenue dans les lignes américaines à 345 kV. La fréquence de coupures dues à la foudre y était beaucoup plus grande que suivant les calculs préalables.

De nombreuses études théoriques, expérimentales et d'exploitation ont été faites. On a proposé des calculs plus sévères des amorçages inverses sur les pylônes en ce qui concerne les paramètres du courant de foudre, le rôle de la tension inducive du pylône, le rôle de la surtension induite par le canal de foudre et de la tension de service dans la surtension produite sur l'isolement du pylône. On a également proposé des règles plus sévères pour l'angle de protection extérieur  $\alpha$ , en descendant à des valeurs de 10...20° ou même des valeurs négatives – pour des hauteurs plus grandes de ligne.

Il est étrange que pour la protection de bâtiments de hauteurs semblables des angles positifs  $\alpha$  relativement grands

semblent être efficaces. On recommande parfois  $\alpha = 30^\circ$  pour des paratonnerres allant jusqu'à quelques dizaines de mètres. Cette différence ne peut pas être expliquée par l'influence du vent sur la ligne de transport, vu que la vitesse du vent lors des orages est relativement petite [1].

On peut se demander si la tension de service d'une ligne à très haute (THT) ou ultrahaute tension (UHT) n'est pas comparable avec la tension du leader descendant saccadé et si elle n'intervient pas de ce fait dans l'angle de protection. En particulier, si la tension du leader est  $-U_1$  et la tension de service est  $+U_s$ , l'amorçage final entre le leader et le conducteur de service dispose d'une tension ( $U_1 + U_s$ ), tandis que l'amorçage vers le conducteur de garde n'a que la tension  $U_1$ . Le rôle de la composante  $U_s$  dépend évidemment du rapport  $U_s/U_1$ .

Il est facile de déterminer la valeur  $U_s$  pour une ligne de transport. Quant à  $U_1$ , les difficultés sont très grandes, comme  $U_1$  subit de grandes variations dans le temps et dans l'espace.

## 2. Tension du leader

On se base sur les diagrammes présentés pour la théorie de relaxation du leader saccadé [2] et reproduits avec quelques suppléments sur la fig. 1. Ce sont cinq répartitions successives de la densité linéaire de la charge  $\sigma_1$  induite le long du canal et en même temps des répartitions de la tension du leader par rapport à la terre  $U_1$ . Cette tension résulte des trois composantes  $U_0$ ,  $U_{R1}$  et  $U_{R2}$ .

Les répartitions a, b, c correspondent à trois moments de la flèche lumineuse (gradin), les répartitions c, d, e à trois moments de la pause suivante. La courbe a représente le moment initial du gradin lumineux ou le moment terminal de la pause précédente, pendant laquelle le canal était arrêté à l'endroit 1. A ce moment la composante  $U_{R1}$  n'existe pas, puisque le streamer du gradin précédent a été transformé en canal de plasma. La courbe b correspond au moment intermédiaire du gradin lumineux, lorsque le streamer a parcouru le chemin 1–2, avec une composante  $U_{R1}$ . La répartition c représente le moment terminal du gradin et le moment initial de la pause suivante, lorsque le streamer a parcouru le chemin 1–3, avec la composante maximum  $U_{R1\max}$ .

La courbe d correspond à un moment intermédiaire de la pause, où la composante  $U_{R1} < U_{R1\max}$ ; le streamer est en train de se transformer en canal de plasma. Enfin la courbe e montre le moment terminal de la pause et le moment initial de la flèche lumineuse suivante, semblable à la courbe a. Dans tous les cas on peut écrire

$$U_1 = U_0 - U_{R1} - U_{R2} \quad (1)$$

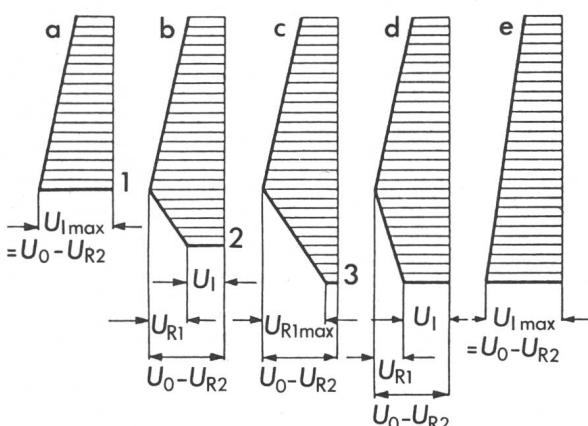


Fig. 1 Répartitions de la densité linéaire de charge ou répartition de la tension le long du leader descendant

a, b, c moments successifs du gradin  
c, d, e moments successifs de la pause

$U_0$  tension primaire produite par les charges du nuage chargé, court-circuitée par le canal de la foudre

$U_{R1}$  chute de tension ohmique le long du streamer relativement froid de la flèche lumineuse

$U_{R2}$  chute de tension ohmique le long du canal de plasma très chaud

Dans les cas a et e

$$U_{R1} \approx 0, U_{1\max} \approx U_0 - U_{R2} \quad (2)$$

Dans le cas c

$$U_{R1\max} \approx U_0 - U_{R2}, U_1 \approx 0 \quad (3)$$

C'est évidemment la valeur  $U_{1\max}$  dont on doit tenir compte pour l'amorçage de la dernière partie du canal de foudre, soit en forme du dernier gradin du leader descendant, soit en forme de l'antileader ascendant. Cette valeur  $U_{1\max}$  n'entre en jeu que pour une petite fraction de la pause. Si la pause est d'environ 50 µs, la dite fraction ne dépasse pas quelques microsecondes. Pour les études en laboratoire sur les angles de protection on peut donc recommander plutôt des ondes de choc atmosphériques et non des ondes de manœuvre.

### 3. Evaluation de la tension maximum du leader contre terre

Compte tenu de l'importance de la tension  $U_{1\max}$  on va appliquer trois méthodes pour l'évaluer.

#### 3.1 Méthode de l'impédance d'onde

La première méthode consiste à utiliser les évaluations récentes [3] de l'impédance d'onde  $Z$  de la décharge principale resp. de la décharge de retour. On se sert de la formule

$$U_{1\max} = Z i_{0\max} \quad (4)$$

où  $i_{0\max}$  est la valeur de crête du courant de choc correspondant à une résistance négligeable de l'objet foudroyé.

Les résultats des calculs suivant la formule (4) sont présentés dans le tableau I. Pour une foudre très faible de 3 kA on y trouve  $U_{1\max} = 5,85$  MV. Si les coups très faibles descendaient jusqu'à 2 kA, chose douteuse, des valeurs  $U_{1\max} = 3,9$  MV seraient possibles.

#### 3.2 Méthode du gradient du streamer

En tenant compte du gradient moyen  $E_{R1}$  du streamer et de la longueur  $a_1$  du gradin lumineux, on écrit

$$U_{R1\max} = a_1 E_{R1} \quad (5)$$

Les équations (2) et (3) montrent l'égalité approximative des tensions  $U_{1\max}$  et  $U_{R1\max}$  (fig. 1). On a par conséquent

$$U_{1\max} = a_1 E_{R1} \quad (6)$$

En admettant, plutôt arbitrairement,  $a_1 = 5 \dots 150$  m,  $E_{R1} = 5$  kV/cm, on obtient  $U_{1\max} = 2,5 \dots 75$  MV.

#### 3.3 Méthode du courant du leader

Cette méthode consiste à utiliser la formule du courant du leader descendant saccadé [2]

$$i_1 = \pi \varepsilon \frac{(U_0 - U_{R\text{moy}}) v_1}{\ln(a/r) - 1} \quad (7)$$

Estimations de la tension  $U_{1\max}$

Tableau I

Foudre	très faible	moyenne	forte	extrêmement forte
$i_{0\max}$ kA	3	30	100	500
$Z$ Ω	1950	710	518	308
$U_{1\max}$ MV	5,85	21,3	51,8	154

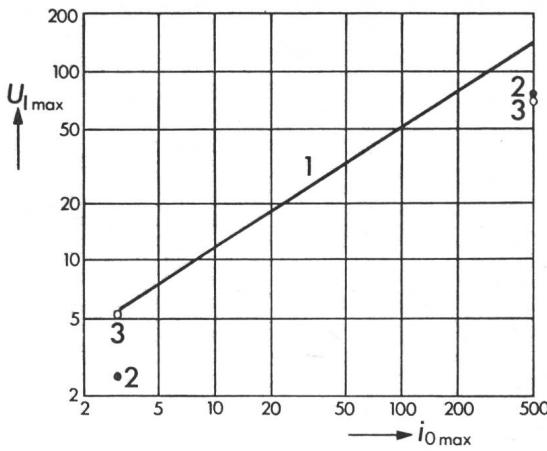


Fig. 2 Tension du leader descendant  $U_{1\max}$  en fonction du courant de foudre  $i_{0\max}$

- 1 méthode de l'impédance d'onde
- 2 méthode du gradient du streamer
- 3 méthode du courant du leader

où  $U_{R\text{moy}}$  est une chute de tension moyenne ohmique le long du leader, entre le maximum ( $U_{R1\max} + U_{R2}$ ) et le minimum  $U_{R2}$ , soit

$$U_{R\text{moy}} = 0,5 U_{R1\max} + U_{R2} \quad (8)$$

$v_1$  est la vitesse moyenne du leader saccadé, compte tenu des pauses (vitesse inférieure à la vitesse du gradin lumineux);  $a, r$  sont la longueur resp. le rayon du leader.

On trouve donc

$$U_{1\max} = 2(U_0 - U_{R\text{moy}}) \quad (9)$$

et enfin

$$U_{1\max} = \frac{2}{\pi \varepsilon} [\ln(a/r) - 1] i_1/v_1 \quad (10)$$

En admettant  $\ln(a/r) = 4,6$ , on arrive à

$$U_{1\max} = 2,6 \cdot 10^5 i_1/v_1 \quad (11)$$

Si l'on choisit  $i_1 = 2 \dots 500$  A,  $v_1 = 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$  m/s (les valeurs inférieures pour les coups de foudre plus faibles), on obtient

$$U_{1\max} = 5,2 \dots 65 \text{ MV}$$

#### 3.4 Comparaison des résultats des trois méthodes

Sur la fig. 2 les résultats des trois méthodes sont représentés: La courbe 1 correspond à la méthode de l'impédance d'onde. Elle correspond approximativement à la formule

$$U_{1\max} = 3(i_{0\max})^{0,6} \quad (12)$$

en MV et kA. Les points 2 correspondent à la méthode du gradient du streamer, les points 3 à la méthode du courant du leader.

Les résultats 1 sont plus complets que les points 2 et 3 ainsi que plus vraisemblables. On emploiera donc la courbe 1.

#### 4. Coefficient du rôle de la tension de service

On caractérise le rôle de la tension de service  $U_s$  par le coefficient

$$\xi = U_s/U_{1\max} \quad (13)$$

Pour une ligne triphasée à tension nominale  $U_n$  on peut adopter

$$U_s = U_n \sqrt{2} / \sqrt{3} \quad (14)$$

ou choisir une valeur un peu plus grande.

Quelques valeurs qui entrent en jeu sont représentées sur la fig. 3. Le coefficient  $\xi$  y est montré en fonction de  $i_{0 \max}$  pour différentes tensions  $U_n$  du réseau triphasé. Cette figure comprend les valeurs  $\xi > 0,02$ ; au dessous de cette limite le rôle de la tension de service pour la zone de protection est probablement petit.

Les courants  $i_{0 \max}$  les plus petits, par exemple de 3...5 kA, donneraient des coefficients  $\xi$  relativement grands, par exemple entre 0,05 et 0,4, fig. 3. Cependant les petits courants de choc ne provoquent pas d'amorçages sur l'isolement de la ligne; la dégradation de l'angle de protection  $\alpha$  n'a donc pas alors des conséquences nuisibles.

Le courant de choc  $i_{0 \max}$  donne sur le conducteur de phase une tension de choc

$$U_p = i_{0 \max} \frac{0,5 Z Z_p}{Z + 0,5 Z_p} \quad (15)$$

où  $Z$  est l'impédance d'onde de la foudre et  $Z_p$  l'impédance d'onde du conducteur de phase.

Comme on considère une foudre négative et une tension de service  $U_s$  positive, il entre en jeu la surtension résultante sur le conducteur de phase

$$U_r = U_p - U_s \quad (16)$$

où  $U_p$  et  $U_s$  sont des valeurs absolues.

Pour la limite de  $i_{0 \max}$  la tension d'amorçage de l'isolement  $U_a$  doit remplir la condition

$$U_r = U_a \quad (17)$$

$$U_p = U_a + U_s \quad (18)$$

où toutes les valeurs sont absolues. Pour chaque valeur de  $U_n$  on a  $U_a$  et  $U_s$ , on calcule  $U_p$  suivant (18) et on trouve la limite correspondante  $i_{0 \max}$  suivant (15)

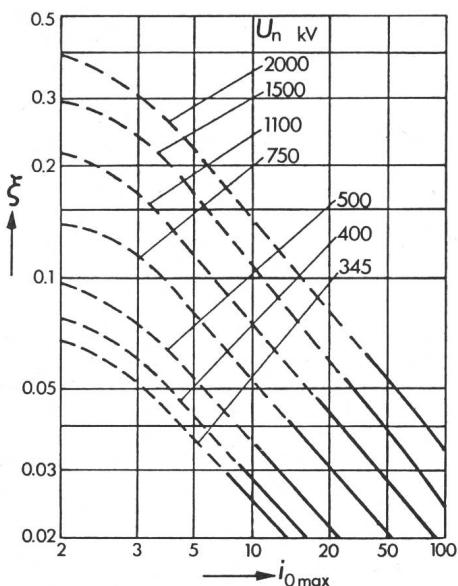


Fig. 3 Rapport des tensions  $\xi$  en fonction du courant de foudre  $i_{0 \max}$  pour différentes tensions  $U_n$  du réseau

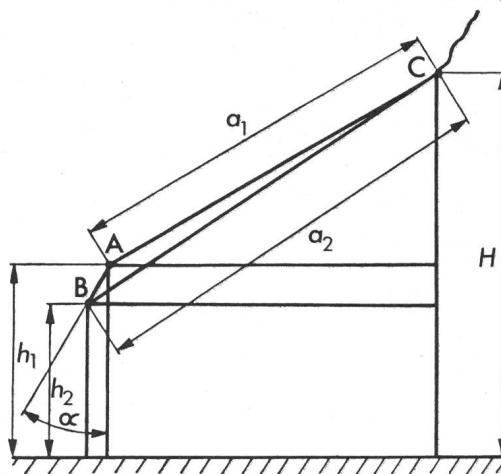


Fig. 4 Croquis géométrique

- A conducteur de garde
- B conducteur de phase
- C leader arrêté

$$i_{0 \max} = U_p \frac{Z + 0,5 Z_p}{0,5 Z Z_p} \quad (19)$$

Dans cette formule, la valeur de  $Z$  doit être évaluée par tâtonnement. Les valeurs limites de  $i_{0 \max}$  sont présentées sur la fig. 3 comme limite entre les parties continues et les parties hachées des courbes. Ce ne sont que les parties continues qui ont une importance pratique. Ainsi pour  $U_n = 345$  kV entrent en jeu les valeurs  $i_{0 \max} = 7...15$  kA,  $\xi = 0,02...0,03$ ; pour  $U_n = 1500$  kV on trouve  $i_{0 \max} = 25...150$  kA et  $\xi = 0,02...0,055$ .

Comme il fallait s'y attendre, l'influence de la tension de service sur la zone de protection augmente lorsqu'on passe des réseaux THT aux réseaux à UHT de plus en plus élevées.

## 5. Philosophie géométrique

Pour passer des valeurs calculées  $\xi$  aux angles de protections  $\alpha$ , on va appliquer la géométrie. Cette façon de procéder, représentée par plus d'une dizaine d'auteurs, consiste à considérer une foudre latérale et à comparer les distances entre l'extrémité inférieure du leader descendant saccadé et trois objets qui peuvent être foudroyés: le conducteur de garde, le conducteur de service et le sol plat. L'auteur n'est pas partisan de la méthode géométrique de la foudre, il l'emploie donc avec toute la réserve dictée par le manque de bases physiques.

On considère la fig. 4. Le conducteur de garde A et le conducteur de service B sont menacés par la foudre, dont on admet la position C de l'extrémité du leader. Le choix de la hauteur  $H$  du point C est un point faible de la méthode. Sur la fig. 4 l'angle de protection  $\alpha$  a le signe négatif, la distance  $a_2$  étant sensiblement plus grande que la distance  $a_1$ , compte tenu de la tension plus élevée.

Des relations géométriques simples mènent à la formule

$$\tan \alpha = [ \sqrt{a_1^2 - (H - h_1)^2} - \sqrt{a_2^2 - (H - h_2)^2} ] / (h_1 - h_2) \quad (20)$$

Les valeurs  $\alpha$  selon (20) sont représentées sur la fig. 5 en fonction du rapport  $H/h_1$  pour différentes valeurs  $a_2/a_1$ , correspondant en quelque sorte au rapport des tensions

$$1 + \xi = (U_{1 \max} + U_s) / U_{1 \max} \quad (21)$$

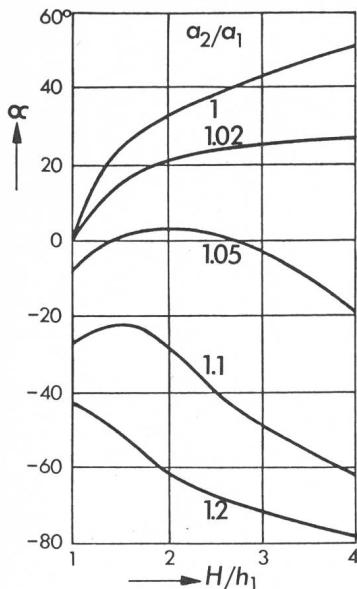


Fig. 5 Angle de protection  $\alpha$  en fonction du rapport  $H/h_1$  pour différents rapports  $a_2/a_1$

La courbe  $a_2/a_1 = 1$  correspond à l'absence de la tension de service  $U_s$ . Elle pourrait être appliquée aux paratonnerres, avec des valeurs typiques de l'angle  $\alpha$  de  $30\ldots45^\circ$ . Les courbes  $a_2/a_1 = 1,02\ldots1,05$  correspondent aux lignes à THT, avec des valeurs typiques de  $\alpha$  de  $15\ldots25^\circ$  pour les tensions inférieures, de  $0\ldots10^\circ$  pour les tensions supérieures. Enfin les courbes  $a_2/a_1$  d'environ  $1,05\ldots1,1$  semblent être applicables aux UHT les plus élevées, avec  $\alpha$  de  $-20\ldots-50^\circ$ .

La construction géométrique de la fig. 4 correspond aux paramètres:  $h_2 = 0,8 h_1$ ,  $H = 2 h_1$ ,  $a_1 = H$ ,  $a_2 = 1,1 a_1$ . On y comprend comment une valeur modérée  $a_2/a_1 = 1,1$  donne un grand angle négatif  $\alpha = -30^\circ$ .

## 6. Nécessité et possibilité d'une vérification expérimentale

Comme la méthode géométrique n'est pas assez sûre, il est nécessaire d'appliquer des méthodes expérimentales: méthodes de laboratoire et observations dans la nature.

Les laboratoires d'environ 5 MV permettent de faire des essais des angles de protection à l'échelle 1 : 1 pour les plus faibles coups de foudre, de 2...3 kA. Pour les coups plus forts, de 5...10...20...50 kA, on peut exécuter des essais à l'échelle 1 : 2, 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20, avec le risque de plus en plus grand de s'écartez de la nature.

Comme étude dans la nature, on fait depuis quelques années des observations des traces de la foudre sur des crêtes rocheuses des Tatras [4; 5; 6]. On distingue les cols et les sommets avec de nombreux foudroiements ou sans foudre. Cette étude couvre des milliers d'années. Les résultats se rapportent surtout à des angles  $\beta$ , établis pour des cols avec deux sommets voisins.

Il n'est pas indispensable de vérifier toutes les variantes géométriques au laboratoire ou dans la nature. Il suffit d'obtenir quelques résultats expérimentaux et de les confronter avec la méthode géométrique. On obtiendra ainsi des bases expérimentales par exemple des règles relatives au rapport  $H/h_1$ .

## 7. Polarité de la foudre

Pour des lignes situées dans un climat modéré ou chaud et sur un terrain à peu près plat on doit tenir compte de la polarité négative du leader et de la polarité positive du conducteur de service. Pour une ligne à courant continu on pourrait alors appliquer une règle sévère seulement pour le conducteur positif, tandis que la protection du conducteur négatif pourrait être arrangée plus économiquement sans tenir compte de la tension de service.

A la montagne [7] ou dans un climat froid [8] la foudre positive est relativement fréquente. On doit alors étudier la protection avec des leaders des deux polarités et avec des polarités inverses des conducteurs de service. La protection d'une ligne à courant continu sera donc à peu près symétrique pour les deux conducteurs.

L'étude des règles de protection peut donner des résultats différents pour les deux polarités. En effet la formation de l'antileader du conducteur de service est favorisée par la polarité positive de la tension de service.

## Bibliographie

- [1] S. Szpor and A. Furdal: Winds during thunderstorms. Archiwum Elektrotechniki 20(1971)2, p. 421..431.
- [2] S. Szpor: Théorie de relaxation du leader saccadé de la foudre. Bull. ASE/UCS 68(1977)24, p. 1293..1296.
- [3] S. Szpor: Théorie de la décharge principale de la foudre. Bull. ASE/UCS 69(1978)18, p. 980..985.
- [4] S. Szpor: Influence de la foudre sur la forme de crêtes à la montagne. I. Analyse générale. Acta Geophysica Polonica 24(1976)1, p. 81..84.
- [5] S. Szpor and W. Turkowski: La première série d'études sur l'angle de protection dans les Tatras granitiques. Archiwum Elektrotechniki 26(1977)3, p. 523..538.
- [6] S. Szpor u.a.: Beobachtungen der Schutzwinkel an Tatra-Graten. Bericht Nr. R. 2.01 der 14. Blitzschutzkonferenz, Gdansk, 1978.
- [7] K. Berger und E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1966 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2..22.
- [8] T. Takeuti a.o.: On the anomalous cloud-to-ground discharges observed in Sweden. Rapport UURIE 103:78. Uppsala, Institute of High Voltage Research, Uppsala University, 1978.

## Adresse de l'auteur

Prof. en retraite Dr. techn. Stanislaw Szpor, Institut des Hautes Tensions et des Appareils Electriques, Ecole Polytechnique de Gdansk, Gdansk, Pologne.