

Evaluations des risques encourus par des personnes travaillant à l'extérieur sur des installations mobiles de radio ou de télécommunications en cas de foudroiement

Evaluation of the risks which occurred to persons who works with mobile radio communication installations during a lightning stroke

Dr. B. Bouriot et E. de Raemy

Résumé

Qui dit mobile, dit déplacements fréquents. Le temps et les frais de montage et de démontage d'une telle installation doivent donc être réduits au minimum. Cela se ressent dans le système de mise à terre, qui sera lui aussi minimal. Que se passera-t-il avec les utilisateurs de l'installation en cas de coup de foudre? L'étude présentée ci-dessous montre comment répondre à cette interrogation. Pour cela, des essais sur des installations radio réelles, ainsi que des simulations numériques ont été réalisés. Les résultats ainsi obtenus ont été comparés à des limites définies dans le cadre de cette étude.

Abstract

Mobile means that something has to be moved often. The time and the costs for mounting and removing this installation have to be minimal. Also the earthing system will be minimal. What happens with the user of such an installation in the case of a lightning stroke? The study described below shows how to give an answer to this question. For this study, tests on a real radio station and numerical simulations have been performed. The result of these tests and calculations have been compared with limits which have been established as part of this study.

1. Introduction

Une étude a été faite pour le groupement de l'armement de la confédération Suisse dont le but est de déterminer si les opérateurs d'installations de radio communication **mobiles** sont suffisamment protégés en cas de coup de foudre sur l'installation.

Après un rappel sur la définition d'installations mobiles et des problèmes spécifiques de protection contre la foudre pour ce type d'installation, l'étude se décompose en trois parties :

- définition des limites d'absorption d'énergie supportable par l'homme
- simulation numérique par les méthodes des éléments finis
- validation du calcul par des essais de foudroiement d'une installation type

1.1. Qu'est-ce qu'une installation mobile ?

Toute installation placée à un endroit pour un temps limité (de quelques heures à quelques mois) est considérée comme étant une installation mobile.

Dans le cadre de l'armée, cela peut aller d'une simple station de transmission à un centre complet de communication.

Dans le domaine civil, d'autres installations mobiles pourraient être concernées, comme par exemple une installation de chantier (grue,...) ou un chapiteau de fête...

1.2. Problèmes spécifiques liés aux installations mobiles

La mobilité d'une installation impose un concept influençant les mesures de protection contre la foudre:

- les montages et démontages doivent être rapides et à moindre coût.
En conséquent, la mise à terre doit être simple, de caractère provisoire, complètement démontable et d'ampleur limitée.

Certaines normes sont applicables pour la protection des installations mobiles. Elles indiquent les mesures minimums à mettre en place. Par exemple, la norme allemande VDE 0855 - Partie 1 prévoit comme mise à terre pour une antenne placée à l'extérieur d'un bâtiment soit un piquet de terre de 1,5 m de longueur, soit un ruban de terre de 3 m de long enterré à une profondeur de 50 cm.

- l'emplacement d'une installation mobile est très varié.
Il peut être placé sur un sol d'humus offrant une conductivité électrique satisfaisante, qui permet d'y enfoncer facilement un piquet de terre, ou sur un terrain caillouteux avec une résistivité électrique élevée où il sera extrêmement difficile d'enfoncer un piquet de terre.
En conclusion, une mise à terre ne peut être simple et efficace que pour un sol donné.

2. Définition des limites d'absorption d'énergie supportable par l'homme

2.1. Connaissances du sujet

Dans la littérature il est difficile de trouver des données précises concernant les courants, les tensions et l'énergie supportée ou au contraire fatale à l'être humain en cas de coup de foudre.

Contrairement aux accidents d'électrocution dus au réseau d'alimentation public, les accidents de foudroiement ne permettent aucune reconstitution des courants ayant provoqué les blessures ou la mort des victimes, car le courant de foudre au moment de l'accident est inconnu.

Le seul moyen d'estimer les limites supportables par l'être humain est d'extrapoler les résultats d'essais en laboratoire sur des animaux à l'homme.

2.2. Etudes faites sur des animaux

Des études ont été faites sur des petits rongeurs (lapin, rat, souris) [1], sur des moutons et sur des cochons [2]. Il semble que les moutons et les cochons ont l'avantage d'avoir un cœur qui correspond mieux à celui de l'être humain.

Toutes ces études donnent des résultats qui peuvent varier d'un facteur 10 à 100.

Le tableau 1 présente un résumé succinct des résultats obtenus :

Etude	Energie extrapolée à l'homme	Conséquence
essais sur petits rongeurs [1]	quelques kJ	mortelle
essais sur moutons et cochons [2]	30 J	blessures <u>non</u> mortelles
Z. Flisowski et C. Mazzetti [3]	40 J	limite supérieure atteinte
P. Hasse et J. Wiesinger [4]	quelques 10 J	mortelle

Tableau 1 : études sur les animaux

2.3. Limites fixées pour l'étude

Etant donnée la grande divergence des énergies considérées comme absorbables par le corps humain, quatre limites ont été fixées pour cette étude (voir tableau 2).

Ces limites se basent sur un corps humain de 70 kg avec une résistance électrique de 500 Ohm [6].

Limite (énergie)	Signification
5 kJ	fatal (aucune chance de survie)
50 J	très dangereux (petite chance de survie)
15 J	maximum admissible (risque de blessures)
1.5 J	aucun danger

Tableau 2 : Limites d'énergie pour un corps humain de 70 kg simulé par une résistance électrique de 500 Ohm

3. Simulation numérique par les méthodes des éléments finis

3.1. Choix et caractéristiques du programme de simulation

Un programme de calcul utilisant la méthode des éléments finis a été choisi. Il permet d'intégrer dans les calculs les effets d'induction, dus à la présence d'un intense champ magnétique lors de coups de foudre. Dans ce programme, il est possible d'introduire la géométrie exacte de l'installation à simuler.

En revanche, ce programme ne permet pas d'introduire des éléments non linéaires pour simuler des claquages, ni un sol avec une conductivité finie.

3.2. Caractéristiques des modèles utilisés

Modélisation du corps humain La résistance électrique du corps humain donnée dans la littérature dépend souvent du phénomène étudié. Celle-ci peut varier de 150 Ohm à 10 kOhm [3], [5], [6]. Pour des phénomènes dus à la foudre on admet une résistance de 500 Ohm.

Modélisation de la mise à terre Les mises à terre des installations analysées dans cette étude étaient constituées de piquets de terre d'environ 1 m de long et 2 cm de diamètre. La résistance de terre est calculée selon (1) [4]. La valeur de la résistance ainsi obtenue est introduite dans le programme comme élément discret reliant le piquet de terre de 1 m à la surface idéale.

$$R = \frac{r}{2 \cdot \rho \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{L}{r}\right) \quad (1)$$

ρ : résistance spécifique du sol
 L : longueur du piquet de terre
 r : diamètre du piquet de terre

Les simulations ont été faites pour trois types de sol. Un sol d'une bonne ($\rho = 100 \Omega\text{m}$), d'une moyenne ($\rho = 500 \Omega\text{m}$) et d'une mauvaise conductivité ($\rho = 2000 \Omega\text{m}$). De plus il a été admis que plus le sol présentait une conductivité élevée, plus il serait compact et moins le piquet de terre serait enfoncé (75 cm, 50 cm et 25 cm). La résistance des piquets de terre ainsi calculée donne les valeurs suivantes :

$$R_{\text{bon}} = 92 \Omega$$

$$R_{\text{moyen}} = 620 \Omega$$

$$R_{\text{mauvais}} = 4100 \Omega$$

Modélisation du courant de foudre Pour la simulation, une source de courant de forme d'onde double exponentielle a été utilisée. Toutes les configurations simulées ont été calculées pour 5 amplitudes différentes. Les caractéristiques sont donnés dans le tableau 3.

	Temps de montée/ temps de mi- amplitude	Courant de crête
impulsion normative CEI	8 / 20 us	0.5 kA
c. de foudre de faible amplitude	0.33 / 25 us	10 kA
c. de foudre de moyenne amplitude	1.2 / 50 us	25 kA
c. de foudre de forte amplitude	1.3 / 100 us	100 kA
c. de foudre d'extrême amplitude	1.6 / 140 us	200 kA

Tableau 3 : caractéristiques des formes d'onde de courant utilisé pour la simulation

Modélisation des câbles et autres conducteurs électriques Tous les conducteurs électriques ont été admis comme idéaux.

3.3. Exemple de simulation numérique sur une installation mobile

La figure 1 présente une installation simple d'émission et de réception radio. L'antenne placée à une hauteur de 8 m sur un mât métallique est reliée à l'émetteur/récepteur par deux rallonges de chacune 100 m de long. La mise à terre de l'installation se fait par l'intermédiaire de 6 piquets de terre, un par rallonge et un à chaque coin de la tente (6 m x 4 m) qui abrite l'opérateur.

La figure 2 présente la configuration identique à la figure 1 mais telle qu'elle est utilisée pour la simulation.

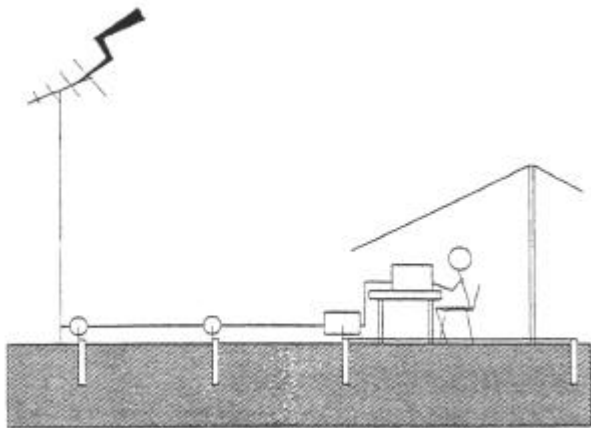


Figure 1: Exemple d'une simple installation mobile telle qu'utilisée pour la simulation

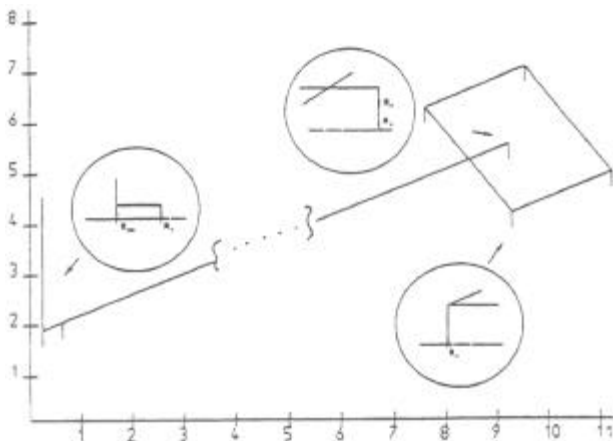


Figure 2: Même configuration que la figure 1 mais telle qu'elle a été introduite pour la simulation.

Le graphique de la figure 3 donne l'énergie que l'opérateur absorberait s'il était en contact avec le récepteur/émetteur au moment du coup de foudre sur l'antenne. Ces résultats démontrent que pour des amplitudes de courant de foudre à partir de 10 kA, la limite considérée comme fatale est dépassée. Ce système de mise à terre, constitué de 6 piquets de terre, est donc insuffisant pour assurer la sécurité de l'opérateur.

D'autres configurations ont été simulées avec des situations simples (figure 1), mais avec des mises à terre différentes; ou avec des installations plus conséquentes telle que centre de communication composé d'appareils, de plusieurs antennes, de lignes téléphoniques, d'une alimentation 230 V, d'une alimentation de secours etc..

Différents sites d'installations ont été analysés. L'opérateur n'est pas exposé au même danger s'il se

trouve sous une tente en pleine campagne, dans un véhicule ou dans une maison. La maison peut en plus être équipée d'une installation de protection contre la foudre.

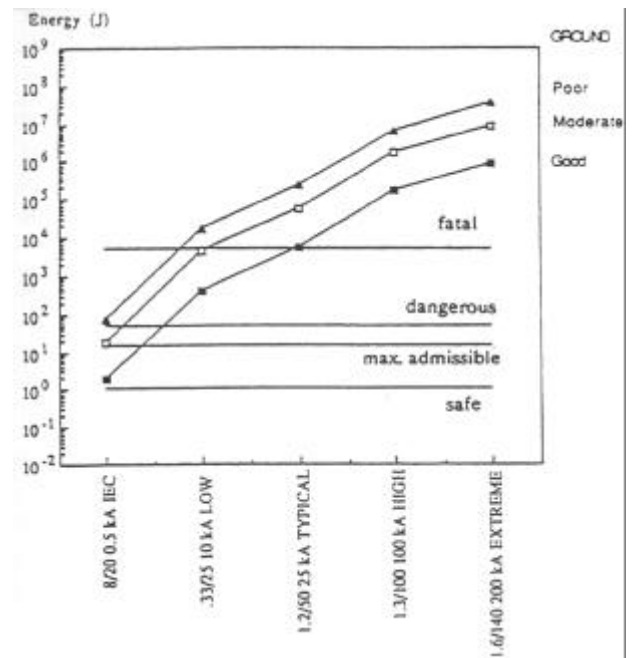


Figure 3: Résultat obtenu lors de la simulation de la configuration de la figure 2.

4. Validation du calcul par des essais de foudroieusement d'une installation

Pour valider des résultats théoriques obtenus par simulation, des essais de foudroieusement ont été faits sur quelques configurations d'installations mobiles. Un générateur de choc a été spécialement conçu pour ces essais.

Générateur de choc Le générateur de choc présente les caractéristiques suivantes: une capacité de 25 uF, une tension de charge max. de 40 kV et un poids de 1200 kg. En court circuit, on a pu mesurer un courant de crête de 90 kA. Lors des essais sur les différentes configurations, les courants étaient de forme double exponentielle (10/250 us) avec une valeur crête de 2.5 kA. Avec ces valeurs, le générateur restait facilement transportable sur le lieu des essais.

Modèle du corps humain Pour la simulation numérique le corps humain a été modélisé par une résistance de 500 Ohm. Une résistance de 500 Ohm a donc été placée pour représenter l'opérateur.

Deux plaques métalliques d'une surface totale équivalente à deux pieds ont été utilisées pour relier la résistance au sol. En plus chaque plaque était lestée de 35 kg de béton afin d'obtenir la même pression au sol qu'un être humain d'un poids de 70 kg (voir figure 4).

Montage d'essai Le montage d'essai est donné à la figure 5. Le générateur était branché entre l'antenne et la terre de fondation du bâtiment voisin. Ce branchement oblige le courant à se refermer par la terre, ce qui correspond à la réalité.

A chaque essai le courant injecté et le courant circulant dans le modèle du corps humain étaient mesurés à l'aide de sondes de courant Pearson reliées à un oscilloscope LeCroy. Afin d'éviter toutes perturbations de la mesure, la chaîne de mesure complète était flottante et l'oscilloscope était placé dans une petite cage de Faraday transportable.

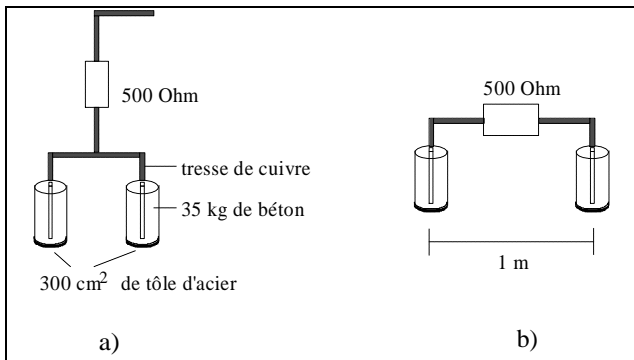


Figure 4: Modèle du corps humain pour la mesure de la tension de contact (a) et la tension de pas (b)

Pour des raisons de place, seul un câble de 100 m a été utilisé pour l'essai. Les courants mesurés sont donnés à la figure 6. L'énergie absorbée par la résistance de 500 Ohm était dans ce cas de 80 J.

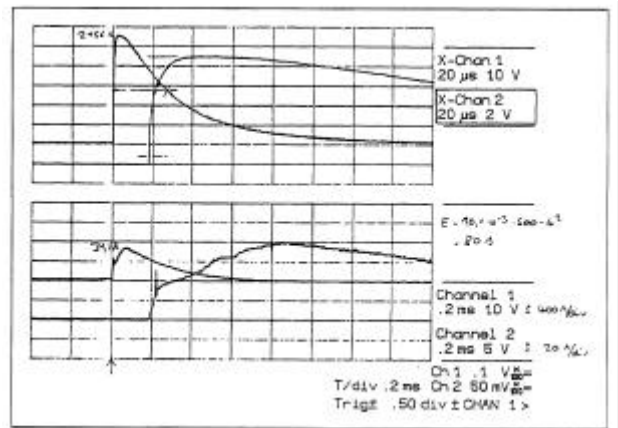


Figure 6: Mesure du courant injecté (traces du haut) et du courant circulant dans le modèle du corps humain (traces du bas).

Extrapolation des résultats et validation de la simulation numérique La forme d'onde utilisée pour l'essai ne correspond pas à un réel coup de foudre. Le temps de montée est trop lent, l'amplitude est trop faible et la durée est trop longue. Afin d'extrapoler la valeur d'énergie mesurée à un coup de foudre réel deux facteurs de correction, k_{ampl} et $k_{\text{duré}}$ ont été introduits.

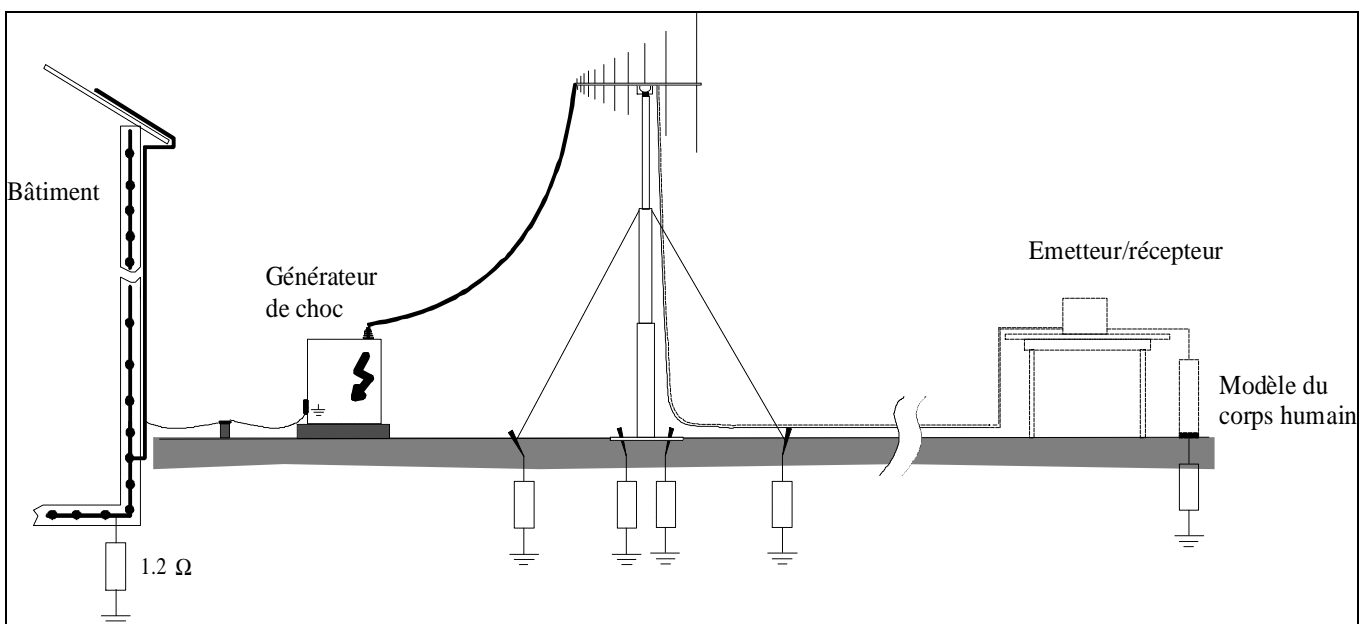


Figure 5: Montage pour les essais de foudrolement d'installation mobile

$$k_{\text{ampl}} = \left(\frac{A_{\text{réel}}}{A_{\text{mesuré}}} \right)^2 \quad k_{\text{duré}} = \left(\frac{T_{\text{réel}}}{T_{\text{mesuré}}} \right) \quad (3)$$

$A_{\text{réel}}$: amplitude d'un coup de foudre réel
 $A_{\text{mesuré}}$: amplitude du courant injecté lors des essais
 $T_{\text{réel}}$: durée de mi-amplitude d'un courant de foudre réel
 $T_{\text{mesuré}}$: durée de mi-amplitude du courant injecté lors des essais

Lors de la définition des deux facteurs, on admet que le système est linéaire. Le courant dans le modèle du corps humain est donc proportionnel au courant injecté.

On admet également que le contenu énergétique d'une impulsion est proportionnel à la durée de l'impulsion et au carré de l'amplitude. Ceci n'est juste que pour une impulsion de forme carrée, mais l'erreur faite dans le cas d'une forme double exponentielle est faible.

Le temps de montée de l'impulsion lors des essais est plus lent que dans la réalité, mais la différence est faible. Le contenu énergétique d'une impulsion ne dépend que peu de son temps de montée si celui-ci est court par rapport à la durée de mi-amplitude. Il n'est donc pas nécessaire d'introduire un facteur de correction pour corriger cette différence.

Dans le cas de l'exemple ci-dessus, l'extrapolation d'un coup de foudre de 100 kA donnerait :

$$k_{\text{ampl}} = 2100 ; k_{\text{duré}} = 0.36$$

$$E_{\text{réel}} = 2100 \cdot 0.36 \cdot 80 \text{ J} = 60 \text{ kJ}$$

La valeur de 80 J dépassant déjà la limite considérée comme très dangereuse, il est inutile d'insister sur le fait que la valeur d'énergie extrapolée sera inévitablement mortelle pour l'opérateur.

Pour la validation du programme de simulation numérique, des simulations ont été faites avec les valeurs de courant et de résistance telles qu'elles ont été mesurées lors des essais. La comparaison des résultats des essais et des simulations est donnée au tableau 4

Configuration	Mesuré	Simulé
un piquet de terre à l'entrée de la tente	$I_{\text{crête}} = 25 \text{ A}$ $E = 48 \text{ J}$	$I_{\text{crête}} = 39 \text{ A}$ $E = 175 \text{ J}$
un piquet de terre à chaque coin de la tente	$I_{\text{crête}} = 31 \text{ A}$ $E = 80 \text{ J}$	$I_{\text{crête}} = 35 \text{ A}$ $E = 122 \text{ J}$
couche conductrice sur le sol de la tente et protection surtension sur les câbles	$I_{\text{crête}} = 0.26 \text{ A}$ $E < 1 \text{ mJ}$	$I_{\text{crête}} = 0.12 \text{ A}$ $E = 0.07 \text{ J}$

Tableau 4 : Comparaison des mesures et des simulations

L'analyse de ces chiffres montre, sauf pour le cas d'un piquet de terre, une concordance entre la mesure et la simulation.

L'énergie mesurée avec une mise à terre composée d'un piquet est plus faible que celle mesurée avec quatre piquets. Ce résultat est contraire à la logique. En théorie, et comme le montre la simulation, la mise à terre avec quatre piquets est meilleure.

Cependant, ce résultat s'explique par le fait que pour le test avec un piquet, la distance entre le piquet et le modèle du corps humain est plus faible.

L'élévation du potentiel du sol est donc plus importante, ce qui a comme conséquence de réduire le courant dans le modèle du corps humain. Ce phénomène n'est pas pris en considération dans le programme de simulation.

5. Conclusion

L'étude a démontré, par essais et simulations, qu'il était possible d'évaluer le risque encouru en cas de coup de foudre par des personnes travaillant avec des installations mobiles.

Pour les installations de radio analysées dans l'étude, il est démontré que les mise à terre usuellement utilisées sont totalement insuffisantes pour assurer la protection des opérateurs de l'installation.

En revanche il serait précieux de compléter cette étude par l'extrapolation de la mesure vers de vrais courants de foudre, en calculant dans le domaine fréquentiel.

Le programme de simulation devrait être modifié afin de pouvoir effectuer les simulations avec un sol non idéal.

En conclusion, les simulations et les essais ont permis d'apporter des solutions sûres et adaptées à chaque situation.

- [1] M. Ohashi, Y. Hosomi, and Y. Fujishiro, The fatal threshold energy of lightning-impulse voltage applied on mice - comparison of the fatal threshold value for rabbits, rats, and mice, (in Japanese), Journal of Tokyo Denryoku Hospital, vol. 10-11, pp. 51-61, 1981.
- [2] C. Dalziel, A study of the hazards of impulse currents, in IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-72, pp. 1032-1043, Oct. 1953.
- [3] Z. Flisowski and C. Mazzetti, An approximate method of assessment of the electric shock hazard by lightning strike, in 18th Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP) Proc. (Munich, Germany), pp. 449-453, 1985.
- [4] P. Hasse and J. Wiesinger, Handbuch für Blitzschutz und Erdung, Pflaum, München, 435-438, 1985.
- [5] H. Freiburger, Der Elektrische Widerstand des menschlichen Körpers, Springer, Berlin, 1934
- [6] W. Boxleitner, Electrostatic Discharge and Electronic Equipment, IEEE Press, New York, Ch. 9, 1989.