

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Measurement of internal electric field in insulating materials – Pressure wave propagation method

Mesurage du champ électrique interne dans les matériaux isolants – Méthode de l'onde de pression

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Measurement of internal electric field in insulating materials – Pressure wave propagation method

Mesurage du champ électrique interne dans les matériaux isolants – Méthode de l'onde de pression

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.99, 29.035.01

ISBN 978-2-8322-8338-7

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and abbreviated terms	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	8
4 Principle of the method.....	9
5 Samples	12
6 Electrode materials.....	12
7 Pressure pulse wave generation	12
8 Set-up of the measurement.....	13
9 Calibrating the electric field	14
10 Measurement procedure	14
11 Data processing for experimental measurement	15
12 Space charge distribution measurement	16
13 Impact of coaxial geometry	16
13.1 Measuring set-up of pressure wave propagation method for the coaxial geometry sample	16
13.2 Physical model in coaxial geometry	17
13.3 Measuring conditions	18
13.4 Calibration of electric field for a coaxial sample	19
13.4.1 Summary	19
13.4.2 Linearity verification	19
13.4.3 Validity verification of the ratio between two current peaks	19
13.4.4 Method for retrieving internal electric field from the measured current signal	20
Annex A (informative) Preconditional method of the original signal for the PWP method on a planar sample.....	22
A.1 Simple integration limitation	22
A.2 Analysis of the resiliency effect and correction procedure	23
A.3 Example of the correction procedure on a PE sample	24
A.4 Estimation of the correction coefficients	25
A.5 MATLAB® code	27
Annex B (informative) Linearity verification of the measuring system	29
B.1 Linearity verification.....	29
B.2 Sample conditions.....	29
B.3 Linearity verification procedure	29
B.4 Example of linearity verification.....	29
Annex C (informative) Measurement examples for planar plaque samples	32
C.1 Samples.....	32
C.2 Pressure pulse generation	32
C.3 Calibration of sample and signal	32
C.4 Testing sample and experimental results	33
C.4.1 Measurement results	33

C.4.2	Internal electric field distribution in the testing sample	34
C.4.3	Distribution of space charge density in the testing sample	36
Annex D (informative)	Measurement examples for coaxial geometry samples	38
D.1	Example of linearity verification of coaxial geometry	38
D.1.1	Sample conditions	38
D.1.2	Linearity verification procedure	38
D.1.3	Example of linearity verification	38
D.2	Verification of the current peak area ratio between the outer and inner electrodes	39
D.2.1	Verification principle	39
D.2.2	Example of verification of the current peak area ratio	40
D.3	Testing sample and experimental results	40
D.3.1	Raw results of measurements	40
D.3.2	Electric field distribution in the coaxial sample	42
D.3.3	Space charge distribution in the coaxial sample	44
Bibliography		46
Figure 1	– Principle of the PWP method	11
Figure 2	– Measurement set-up for the PWP method	13
Figure 3	– Sample of circuit to protect the amplifier from damage by a small discharge on the sample	13
Figure 4	– Diagram of the pressure wave propagation method set-up for a coaxial sample	17
Figure 5	– Diagram of wave propagation of PWP for a coaxial geometry sample	17
Figure 6	– Diagram of the propagation of pressure wave on the section of a cylinder	19
Figure 7	– Flowchart for the computation of the electric field in a coaxial sample from PWP measured currents	21
Figure A.1	– Comparison between practical and ideal pressure pulses	22
Figure A.2	– Original signal of the sample free of charge under moderate voltage	23
Figure A.3	– Comparison between original and corrected reference signals with a sample free of charge under moderate voltage	24
Figure A.4	– Electric field in a sample under voltage with space charge calculated from original and corrected signals	25
Figure A.5	– Geometrical characteristics of the reference signal for the correction coefficient estimation	26
Figure A.6	– Reference signal corrected with coefficients graphically obtained and adjusted	26
Figure A.7	– Electric field in a sample under voltage with space charge calculated with graphically obtained coefficient and adjusted coefficient	27
Figure B.1	– Voltage signals obtained from the oscilloscope by the amplifier with different amplifications	30
Figure B.2	– Current signals induced by the sample, considering the input impedance and the amplification of the amplifier	30
Figure B.3	– Relationship between the measured current peak of the first electrode and applied voltage	31
Figure C.1	– Measured current signal under –5,8 kV	32
Figure C.2	– First measured current signal (< 1 min)	33
Figure C.3	– Measured current signal after 1,5 h under –46,4 kV	33

Figure C.4 – Measured current signal without applied voltage after 1,5 h under –46,4 kV	34
Figure C.5 – Internal electric field distribution under –5,8 kV	34
Figure C.6 – Internal electric field distribution under –46,4 kV, at the initial state	35
Figure C.7 – Internal electric field distribution after 1,5 h under –46,4 kV	35
Figure C.8 – Internal electric field distribution without applied voltage after 1,5 h under –46,4 kV	36
Figure C.9 – Space charge distribution after 1,5 h under –46,4 kV	37
Figure C.10 – Space charge distribution without applied voltage after 1,5 h under –46,4 kV	37
Figure D.1 – Measured currents from the LDPE coaxial sample under different applied voltages in a few minutes	39
Figure D.2 – Relationships between the peak amplitude of the measured current at outer and inner electrodes and applied voltage	39
Figure D.3 – First measured current signal (< 1 min) for the coaxial sample	40
Figure D.4 – Measured current signals for the coaxial sample at beginning and after 2 h under –90,0 kV	41
Figure D.5 – Measured current signals for the coaxial sample after 2 h under –90,0 kV, and without applied voltage after 2 h under high voltage	41
Figure D.6 – Internal electric field distribution under –22,5 kV for the coaxial sample	42
Figure D.7 – Internal electric field distribution under –90,0 kV for the coaxial sample, at the initial state	43
Figure D.8 – Internal electric field distribution after 2 h under –90,0 kV	43
Figure D.9 – Internal electric field distribution without applied voltage after 2 h under –90,0 kV	44
Figure D.10 – Space charge distribution with and without applied voltage after 2 h under –90,0 kV	45
Table A.1 – Variants of symbols used in the text	27
Table D.2 – Analysis of ratio between theoretical and measured peak area for measured current signal	40

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT OF INTERNAL ELECTRIC FIELD IN INSULATING MATERIALS – PRESSURE WAVE PROPAGATION METHOD**FOREWORD**

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62836 has been prepared by IEC technical committee 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems. It is an International Standard.

This first edition cancels and replaces IEC TS 62836 published in 2020.

This edition includes the following significant technical changes with respect to IEC TS 62836:

- a) addition of Clause 12 for the measurement of space charge distribution in a planar sample;
- b) addition of Clause 13 for coaxial geometry samples;
- c) addition of Annex D with measurement examples for coaxial geometry samples;
- d) addition of a Bibliography;
- e) measurement examples for a planar sample have been moved from Clause 12 in IEC TS 62836 to Annex C.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
112/627/FDIS	112/632/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

High-voltage insulating structures, especially high-voltage DC cables and capacitors etc., are subjected to charge accumulation and this can lead to electrical breakdown if the electric field produced by the charges exceeds the electrical breakdown threshold. With the trend to multiply power plants, especially green power plants such as wind or solar generators, more cables will be used for connecting these power plants to the grid and share the electric energy between countries. Therefore, a standardized procedure for testing how the internal electric field can be characterized has become essential for the materials used for the cables, and even the structure of these cables when considering electrodes or the junction between cables. The measurement of the internal electric field provides a tool for comparing materials and helps to establish thresholds on the internal electric field for high-voltage applications in order to avoid risks of breakdown as much as possible. The pressure wave propagation (PWP) method has been used by many researchers to measure the space charge distribution and the internal electric field distribution in insulators. However, since experimental equipment, with slight differences, is developed independently by researchers throughout the world, it is difficult to compare the measurement results between the different equipment.

The procedure outlined in this document provides a reliable point of comparison between different test results carried out by different laboratories in order to avoid interpretation errors. The method is suitable for a planar plaque sample as well as for a coaxial sample, with homogeneous insulating materials of thickness from 0,5 mm to 5 mm.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024

MEASUREMENT OF INTERNAL ELECTRIC FIELD IN INSULATING MATERIALS – PRESSURE WAVE PROPAGATION METHOD

1 Scope

This document provides an efficient and reliable procedure to test the internal electric field in the insulating materials used for high-voltage applications, by using the pressure wave propagation (PWP) method. It is suitable for a planar and coaxial geometry sample with homogeneous insulating materials of thickness larger or equal to 0,5 mm and an electric field higher than 1 kV/mm, but it is also dependent on the thickness of the sample and the pressure wave generator.

2 Normative references

There are no normative references in this document.

3 Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

3.1.1

pressure wave propagation

procedure where a pressure wave is propagated in a material containing electric charges and the induced electric signal from electrodes is measured.

3.1.2

interface charge

net layer of charges between two different materials, either two different insulators or a conductor and an insulator

3.1.3

space charge

net charge inside an insulating dielectric material

3.2 Abbreviated terms

CB	carbon black
EVA	ethylene vinyl acetate
LDPE	low density polyethylene
LIPP	laser induced pressure pulse
PE	polyethylene
PIPP	piezoelectric induced pressure pulse
PMMA	poly methyl methacrylate
PWP	pressure wave propagation
S/N	signal to noise ratio

4 Principle of the method

The principle of the PWP method is shown schematically in Figure 1, which is for a planar sample. Figure 1 a) shows the principle and the relation between the current measured with the PWP method and the electric field distribution in the sample without space charge. Figure 1 b) shows the principle and the relation between the current measured with the PWP method and the space charge distribution in the sample without applied voltage. Figure 1 c) shows the measuring schematics of the PWP method. In Figure 1, x_f is the position of pulse front, d_0 is the original thickness of sample, and $d_0 \approx d$ in the case of a narrow pulse.

The space charge in the dielectric and the interface charge are forced to move by the action of a pressure wave. The charge displacement then induces an electric signal in the circuit which is an image of the charge distribution in short-circuit current measurement conditions. The expression for the short-circuit current signal with time t is

$$i(t) = C_0 \int_0^d B E(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (1)$$

where

$E(x)$ is the electric field distribution in the sample at position x ;

d is the thickness of sample;

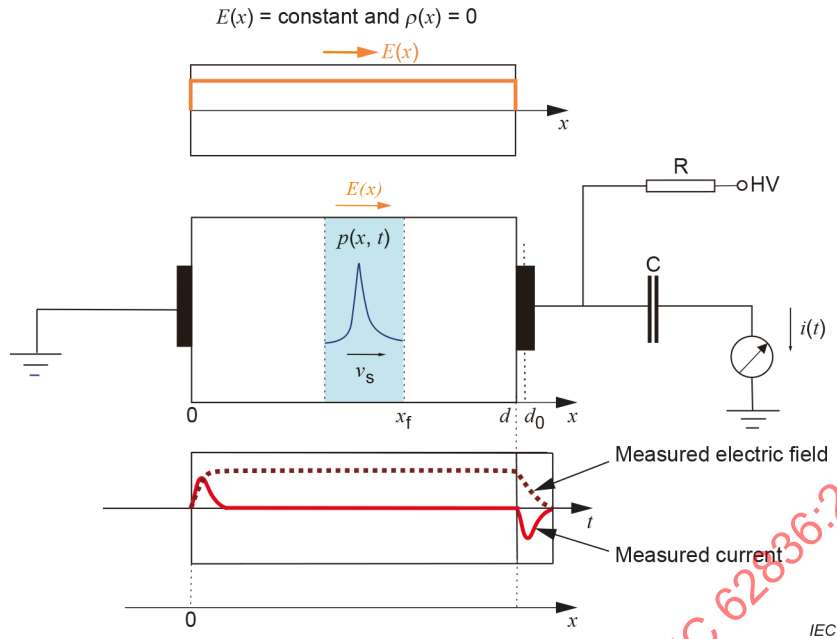
$p(x, t)$ is the pressure wave in the sample, which depends on the electrode materials, dielectric sample material, the condition of coupling on the interface, etc.;

C_0 is the sample capacitance with the action of a pressure wave. The active area is the area on which the pressure wave acts, and it shall be less than the area of the measuring electrode.

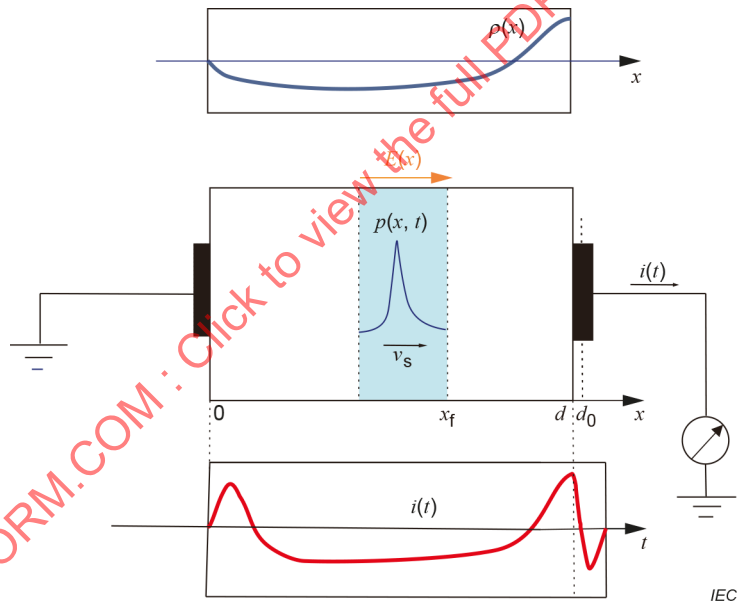
C_0 depends on the thickness of the sample, and its surface area which is equal to the area of action of the pressure wave.

The constant $B = \chi(1 - a/\epsilon)$ only depends on the characteristics of the dielectric materials. In this formula, χ is the coefficient of compressibility of the material, ϵ is the permittivity of the material and a is the coefficient of electrostriction of the material. For heterogeneous dielectric materials, B is a function of position. For homogeneous dielectric materials, B is thus put outside the integral as it does not depend on positions. However, B depends on the measurement conditions. The measurement is carried out in given environmental conditions so B shall be determined during the calibration in the same conditions (temperature, humidity and pressure). In this document, only homogeneous dielectric materials are considered, so B is a constant.

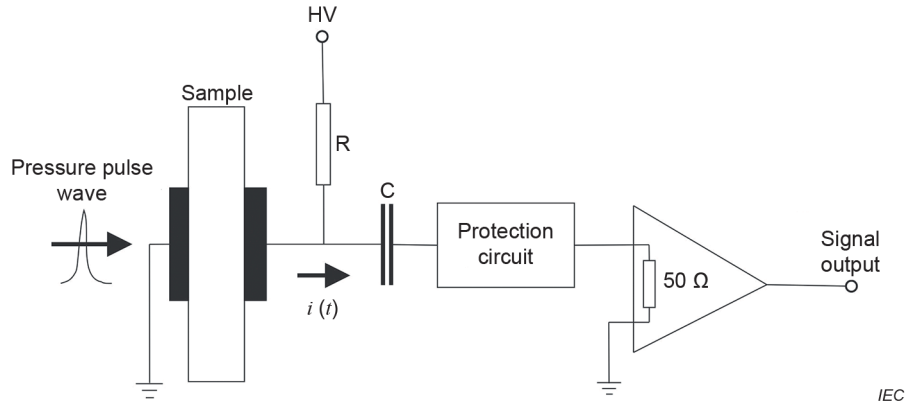
In Equation (1), the electric field distribution can be obtained if it is deconvolved.



a) Applied pressure pulse and measured short-circuit current with applied voltage but without space charge



b) Applied pressure pulse and measured short-circuit current with space charge but without applied voltage



c) Measuring schematics

Key

- x_f position of pulse front
 d_0 original thickness of sample
 $d_0 \approx d$ in the case of a narrow pulse

Figure 1 – Principle of the PWP method

The applied pressure wave can be generated by different techniques, but the same kind of analysis can be done for any of these techniques. The main practical PWP method can be divided into two ways: a pressure pulse is induced by a powerful laser pulse, a technique called LIPP method, and a pressure pulse generated by a piezoelectric device, a technique called PIPP. The sensibility and resolution of the PWP method depends mainly on the amplitude and duration of the pressure pulse. The advantage of the LIPP method is to produce highly sensitive measurements without contact. The advantage of the PIPP method is to obtain the measurement with a high measuring rate and allow a low-cost measurement system.

In the case of a narrow pulse, for example when the duration of the pressure pulse is much smaller than the transit time of the pressure wave in the sample, τ is the pressure pulse duration with $\tau \ll [\min(d_0, d_x)] / v_s$,

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^t i(t') dt' = C_0 B \overline{E(x)} \int_0^d p(x, t) dx \\ x = v_s t \end{array} \right. \quad (2)$$

where

- v_s is the sound speed in the sample;
 $\overline{E(x)}, x = v_s t$ is the mean electric field during the pressure pulse width at the position x . For simplicity, it is shown as $\overline{E(x = v_s t)}$ in this document.

Because of sound loss and sound dispersion in polymer dielectrics, the amplitude of $p(x,t)$ will decrease, and the width of $p(x,t)$ will increase during the propagation of a pressure pulse in the sample. For polymer dielectrics, the sound dispersion is dominant, therefore, even if $p(x,t)$ is not a constant in the dielectrics, its integral $\int_0^d p(x,t) dx$ remains constant during its propagation in the sample.

From Equation (2), if the signal is obtained with a sample free of charges and submitted to an intermediate voltage U_0 , $B \int_0^d p(x,t) dx$ can be obtained since the electric field $\overline{E(x = v_s t)} = E_0$ is uniform in this case and the sample capacitance C_0 is inversely proportional to the thickness of the sample. This can be used as a calibration base for the other measurements.

5 Samples

A dielectric insulating material is suggested, for example polyethylene, with a thickness of 1 mm or 2 mm planar plaque sample with a diameter sufficiently large to avoid edge discharges, typically larger than 200 mm with 50 mm disc form centred electrodes for 60 kV.

6 Electrode materials

The selection of electrode materials depends on the method of the generation of the pressure pulse wave. Usually, semi-conductive electrodes with ethylene-vinyl acetate (EVA) + carbon black (CB) or polyethylene (PE) + carbon black (CB) are used. For laser PWP (also called LIPP), the suitable thickness of the semi-conductive electrode is about 0,5 mm, and it shall be less than 1 mm. If the acoustic impedances are different for the electrode and the insulator, the transit time of the pressure wave through the electrode should be at least half the one in the insulator to avoid spurious echoes.

It is important to keep good contact between the electrode and the insulator. It is recommended to use the hot-press method for marking the electrode on the sample.

NOTE The hot-press method is an effective and simple way for bonding semi-conductive electrode(s) and the PE sample to achieve good interfacial contacts between them. It involves the application of a uniaxial pressure at a temperature in a time duration which depend on the materials of the sample and electrodes.

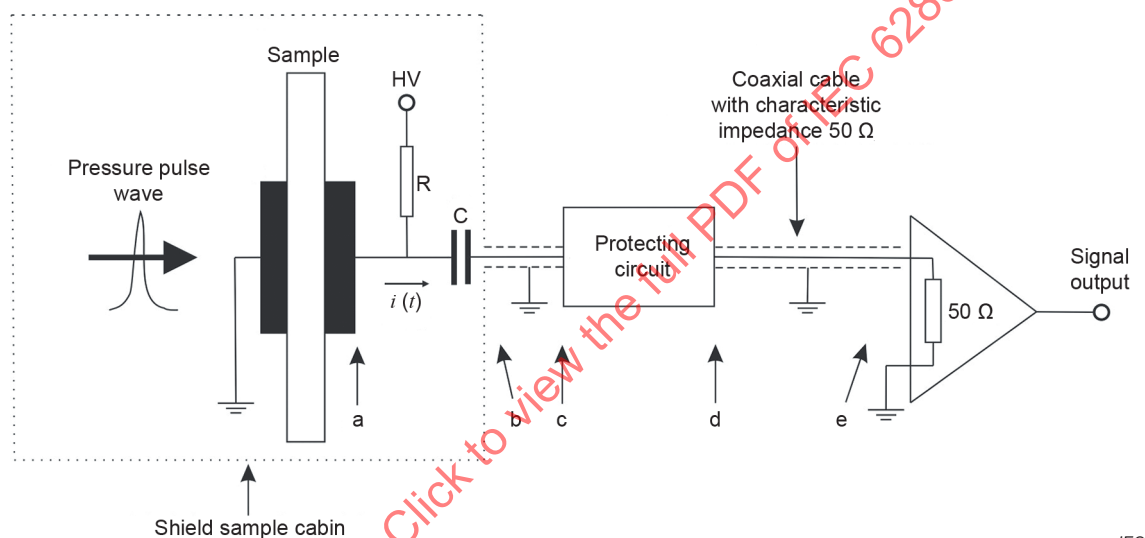
7 Pressure pulse wave generation

The suggested pressure pulse wave should have a 20 ns to 50 ns duration, and a 1 MPa to 10 MPa amplitude for a sample of 0,5 mm to 5 mm thickness. It can be produced by a piezoelectric driven device, or by a powerful pulsed laser. If a powerful laser is used, the suggested energy is about 300 mJ to 500 mJ per pulse with a 3 ns to 7 ns duration.

NOTE The pressure amplitude, the duration, and the energy of the laser can be adjusted depending on the material tested.

8 Set-up of the measurement

The practical set-up of the measurement is shown in Figure 2. In the practical set-up, the length l_{ab} (the length of the connection between the sample and the output connector, i.e., between a and b) shall be less than 0,5 m. The length l_{bc} of the connection cable with the characteristic impedance of $50\ \Omega$ between the output and the protection circuit (between b and c) should be less than 0,5 m. In addition, the length l_{de} of the connection cable with the characteristic impedance of $50\ \Omega$ between the protection circuit and the amplifier (between d and e) should be less than 0,5 m. The total length of $l_{bc} + l_{de}$ (between b and e) should be less than 0,5 m too. This is the principal suggestion to avoid any reflection effect of the measured signal between the amplifier and the sample, in the case where the input impedance of the amplifier is not the perfect match with the signal cable. An amplifier with a 40 dB and 200 MHz bandwidth is suitable. The input impedance of the amplifier should be strictly $50\ \Omega$ to avoid the unwanted reflecting signal. The resistance of the resistor R in Figure 2 depends on the conditions of applied voltage, but it shall be in the range of 100 M Ω to 1 G Ω to limit the current in the case of the sample being discharged.



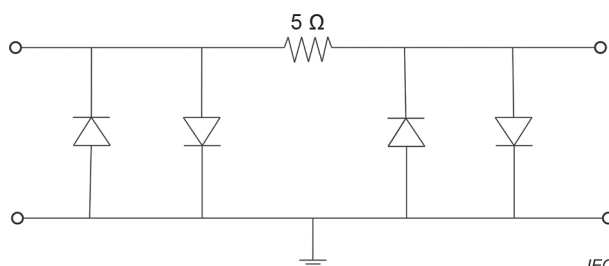
IEC

Key

a, b, c, d and e indicate the real positions in the measuring system.

Figure 2 – Measurement set-up for the PWP method

The practical protection circuit is shown in Figure 3. Diodes in the protection circuit should have a fast recovery time to overcome a quick overvoltage. It is recommended to use a 5 Ω resistor without residual induction in the protection circuit.



IEC

Figure 3 – Sample of circuit to protect the amplifier from damage by a small discharge on the sample

9 Calibrating the electric field

For a planar plaque sample with a thickness of 1 mm to 2 mm, the applied field for calibration is about 5 kV/mm to 10 kV/mm during a short period of time (typically less than 1 min) in order to avoid space charge injection and accumulation. If space charges already exist in the sample prior to the calibration measurement, it is possible to construct the calibration measurement from a measurement under voltage and to subtract from it the signal measured under short-circuit just before or just after the measurement under voltage.

10 Measurement procedure

To implement the same dielectric insulating materials, the same electrode materials, and the same interface condition between the electrode and insulator, one sample with a thickness d_0 is used as the calibrating sample, and another sample with a thickness d_x is used as the testing sample.

For the calibrating sample with the thickness d_0 , voltage U_0 is applied during a short period of time that is quick enough so as to not induce space charge accumulation in the sample. See also Annex C. The internal electric field in the sample is $E_0 = -U_0/d_0$ in the absence of space charge. With the action of the pressure pulse wave, the measured short-circuit current signal will be

$$i_c(t) = C_0 B \int_0^{d_0} E_0 \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (3)$$

Applying an integration over time on this current signal, one obtains

$$\int_0^t i_c(t') dt' = C_0 B E_0 \int_0^{d_0} p(x, t) dx \quad (4)$$

where $\bar{E} = E_0$ since the electric field is uniform.

For the testing sample with the thickness d_x , the measured short-circuit signal is

$$i_m(t) = C_0 B \int_0^{d_x} E(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (5)$$

Now, the internal electric field depends on the applied voltage and space charge. It is therefore no longer a uniform field but varies as a function of the space position. After integration over time, one has

$$\int_0^t i_m(t') dt' = C_x B \overline{E(x = v_s t)} \int_0^{d_x} p(x, t) dx \quad (6)$$

11 Data processing for experimental measurement

The integral of the pressure pulse is the same for the testing sample and for the calibrating sample, i.e.

$$\int_0^{d_0} p(x, t) dx = \int_0^{d_x} p(x, t) dx \quad (7)$$

If the active area of the pressure pulse is S_0 , then

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_0}, C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_x}, E_0 = -\frac{U_0}{d_0} \quad (8)$$

So, one has

$$\frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_x} \overline{E(x = v_s t)} \int_0^{d_x} p(x, t) dx}{-\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_0} B \frac{U_0}{d_0} \int_0^{d_0} p(x, t) dx} = \frac{-d_0 \overline{E(x = v_s t)} d_0}{d_x U_0} \quad (9)$$

The following can be obtained

$$\overline{E(x = v_s t)} = \frac{-\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} \times \frac{d_x U_0}{d_0^2} \quad (10)$$

If the thickness and tested area are equal for the testing sample and for the calibrating sample, or if the testing sample is also used as the calibrating sample $d_0 = d_x$

$$\overline{E(x = v_s t)} = -\frac{U_0}{d_0} \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} = E_0 \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} \quad (11)$$

Therefore, the internal electric field can be obtained from the above Equation (11). The method is suitable both for the sample under voltage and for the sample in short-circuit containing space charge.

It can be noticed that the denominator of that expression should be a constant since the electric field is uniform in the case of the calibration measurement. In order to improve the signal to

noise ratio, the denominator can be safely replaced by the amplitude of the integral once calculated, or by the integral of the first peak as

$$\overline{E(x = v_s t)} = -\frac{U_0}{d_0} \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} = E_0 \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} \quad (12)$$

In Equation (12), τ is the duration of the pressure pulse in the sample, the denominator of the equation is no longer a function of time, but the definite integral of the first peak of the measured current. The upper limit of the integral is set to 5τ to ensure that the first peak of current is completely included. The upper limit can be adjusted according to the conditions.

12 Space charge distribution measurement

With Equation (12), pressure wave velocity $x = v_s t$ and Poisson's equation for one dimension

$\rho(x) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial x}$, the space charge distribution can be obtained as follows:

$$\rho_m(x = v_s t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{v_s} \cdot \frac{E_0}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} \cdot i_m(t) = \gamma \cdot i_m(t) \quad (13)$$

where $\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{v_s} \cdot \frac{E_0}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} = \gamma$ is a constant depending only on the properties of the sample.

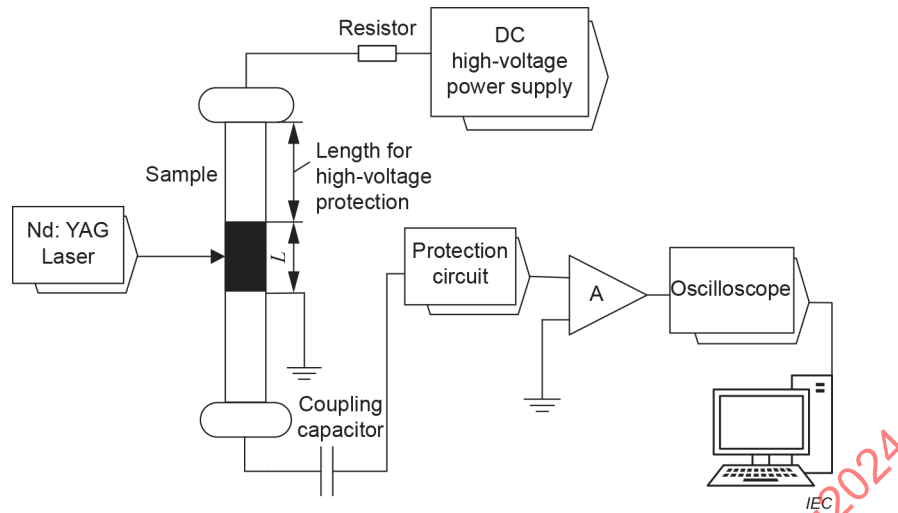
Equation (13) is suitable for any applied measuring voltage, and γ can be determined by the measured current signal under lower applied voltage. See also Clause 9.

13 Impact of coaxial geometry

13.1 Measuring set-up of pressure wave propagation method for the coaxial geometry sample

For coaxial geometry samples like a cable etc., the measurement is not exactly the same as in the case of a planar plaque sample.

Figure 4 shows the diagram of the set-up of the pressure wave propagation method for a coaxial sample such as a shortened cable. If the sample is cut from a real long cable, its semiconducting layer at both ends shall be removed to avoid the occurrence of flashovers, which length is dependent on the applied voltage during the testing. The semiconductor layer is kept in the middle part of the cable to maintain a well-defined electric field at the measuring position. The length L shall be plus 10 times the diameter of active area and plus 10 times the insulation thickness. A high-voltage DC power source is connected to one side of the cable conductor through a high-voltage resistor. The pressure wave can be induced by a powerful pulsed laser or a piezoelectric pressure wave generator, which is the same as that described in Clause 7.



Key

The black part on the sample represents the outer semi-conductive shield layer.

Figure 4 – Diagram of the pressure wave propagation method set-up for a coaxial sample

The signal passes through a coupling capacitor, protection circuit, amplifier, to be received by a digital oscilloscope and finally, further data processing is carried out on a computer.

13.2 Physical model in coaxial geometry

In the physical model shown in Figure 5, the inner and outer radius of the dielectric of a coaxial sample are respectively r_i and r_o . Considering one dimension in a cylindrical system, the pressure waves are assumed to propagate into this sample along the radius, and Poisson's equation becomes

$$\text{div}[\varepsilon E(r)] = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial [r \cdot \varepsilon \cdot E(r)]}{\partial r} = \rho(r) \quad (14)$$

where $E(r)$ is the electric field along the radius, ε is the dielectric constant and $\rho(r)$ is the distribution of space charge density.

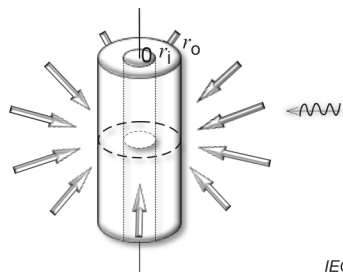


Figure 5 – Diagram of wave propagation of PWP for a coaxial geometry sample

From the physical model, the expression of the signal in short-circuit conditions in case of uniform materials with coaxial geometry can be expressed as follows:

$$i_m(t) = -C_0 \left\{ (1+A) \chi \int \left[E(r) \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} \right] dr + 2 \int \frac{E(r)}{r} \cdot \frac{\partial \eta(r,t)}{\partial t} dr \right\} \quad (15)$$

It is equivalent to Equation (1) for the planar plaque sample. Here, C_0 is the capacitance of the sample with the action of a pressure wave, $\eta(r,t)$ is the material displacement, the constant A is related to the pressure $p(r,t)$ and the dielectric constant ε . But Equation (15) does not directly reflect the relationship between the space charge and the measured current as it depends both on the pressure wave $p(r,t)$ and material displacement $\eta(r,t)$. When the inner radius r_i of the coaxial sample is not very small, that is to say 10 times larger than the pressure pulse width, the measured current can be described as the following expression:

$$i_m(t) = -C_0 \chi \left\{ (1+A) \int \left[E(r) \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} \right] dr - 2v \int \frac{E(r)}{r} \cdot p(r,t) dr \right\} \quad (16)$$

where v is the velocity of sound in the sample. When the pressure shape $p(r,t)$ is a narrow pulse with amplitude P_0 and duration τ , and considering negligible dispersion as the pressure wave propagates from outside to inside, the current expression can be simplified as the following equation:

$$i_m(t) = \frac{v^2 \tau}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} P_0 C_0 \chi \sqrt{\frac{r_A}{r_0}} \left[(1+A) \rho(r) + \left(\frac{1}{2} - \frac{3A}{2} \right) \frac{E(r)}{r} \varepsilon_0 \varepsilon_r \right] \quad (17)$$

where $r = vt$.

In the case without space charge, the ratio between current peaks at the two interfaces of the electrode is shown as follows:

$$\frac{i_m(t)|_{r=r_0}}{i_m(t)|_{r=r_i}} = \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

where r_i and r_0 are the radii of the inner electrode and the outer electrode respectively. The peak at the inner electrode is higher than the one at the outer electrode, and the thinner the insulating part of the cable for a fixed outer diameter, the more the ratio approaches to one.

13.3 Measuring conditions

Though the inner radius of the cable is not considered small since the inner radius is at least 10 times the pressure pulse width, a limited effect of spatial dispersion due to geometry can also be present, as illustrated in Figure 6. As a consequence, pressure waves do not focus to point O but deviate. Hence the ratio can be smaller than the one expected. However, this effect is relatively insignificant in the geometry considered since the sample thickness is well under

the Rayleigh distance which explains why the experimental results are close to the theoretical ones.

NOTE For acoustic, or elastic waves emitted from a uniformly excited planar array transmitting a sinusoidal signal, Rayleigh distance (also called Rayleigh length or Rayleigh range), is the distance from the array at which there is a transition from a near-field region, in which the radiated energy is confined to a cylindrical region, to a far-field region, in which the wave field exhibits spherical spreading and the field amplitude varies inversely with range.

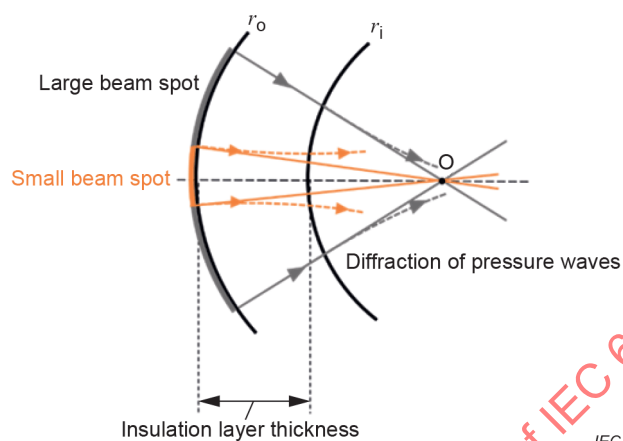


Figure 6 – Diagram of the propagation of pressure wave on the section of a cylinder

There are two terms in Equation (16) and Equation (17). The first term is related to the space charge, and the second is related to the electric field. However, the second term is relatively small in the geometry considered if the radius of the outer electrode is less than three times the radius of the inner electrode.

Therefore, the following three conditions are necessary for the measurement to get the reliable results:

- 1) the inner radius of the coaxial sample is 10 times larger than the pressure pulse width;
- 2) the diameter (or the side length) of the surface area with the action of a pressure wave is larger than the thickness of insulation of the coaxial sample;
- 3) the ratio between the outer and inner radii is less than 3.

13.4 Calibration of electric field for a coaxial sample

13.4.1 Summary

For a coaxial sample with the insulation thickness of 1 mm to 20 mm, the applied average field for calibration is about 3 kV/mm to 5 kV/mm during a short period of time (typically less than 1 min) in order to avoid space charge injection and accumulation.

13.4.2 Linearity verification

The linearity verification of the measuring system for a coaxial sample can be done at any time and at any temperature if necessary, or within a certain period, for example less than one year. The proposed minimum limitation of linearity by the linear correlation coefficient for the PWP method for a coaxial geometry sample is 0,980. If the linearity of the measuring system is lower than the limitation, it is necessary to check the measuring system and sample.

13.4.3 Validity verification of the ratio between two current peaks

In the case without space charge, the ratio between two current peaks at the electrodes should be in accordance with Equation (18). If the inconsistency is bigger than 10 %, it is necessary to check if the conditions in 13.3 are satisfied.

13.4.4 Method for retrieving internal electric field from the measured current signal

It is not easy to get directly the internal electric field distribution from the raw measured current signal by neither Equation (16) nor Equation (17). The flowchart of computational processing shown in Figure 7 is obtained from the measured current in lower applied field for the calibration and the measured current in higher applied field for testing.

The measuring examples for coaxial geometry samples can be found in Annex D.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024

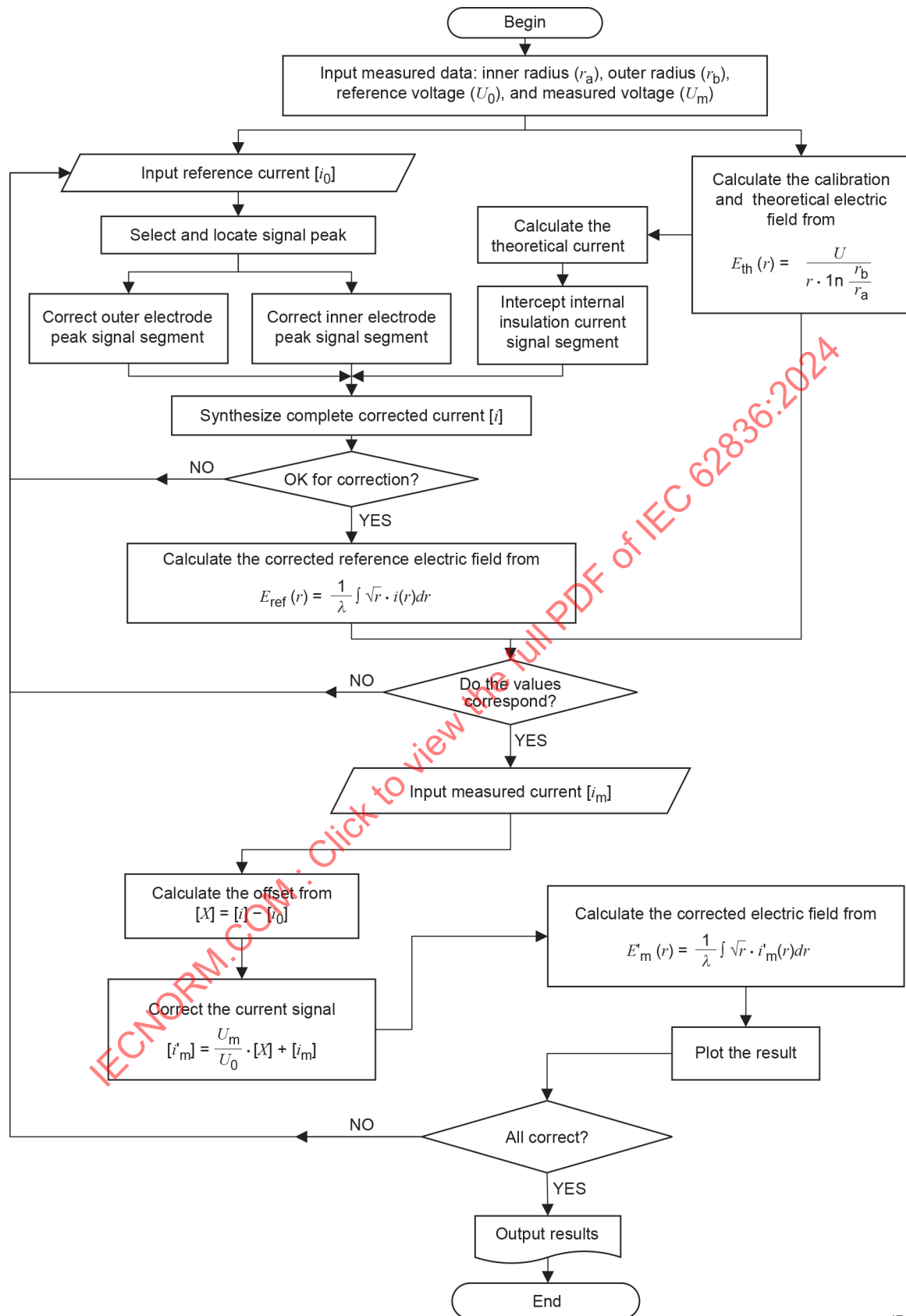


Figure 7 – Flowchart for the computation of the electric field in a coaxial sample from PWP measured currents

Annex A (informative)

Preconditional method of the original signal for the PWP method on a planar sample

A.1 Simple integration limitation

It is known that integration procedures suffer from the presence of offsets of the original signal. Indeed, the integration of an offset leads to a drift that can be erroneously interpreted. For that purpose, the offset of any measured signals shall be removed before implementing an integration. In the case of the laser PWP method, owing to the relaxation of target material, some targets that are used to convert the laser pulse to the pressure pulse show a resiliency resulting in a non-zero pressure amplitude after the pulse, as illustrated in Figure A.1. That is the case of the carbon loaded EVA target as shown in Figure A.2.

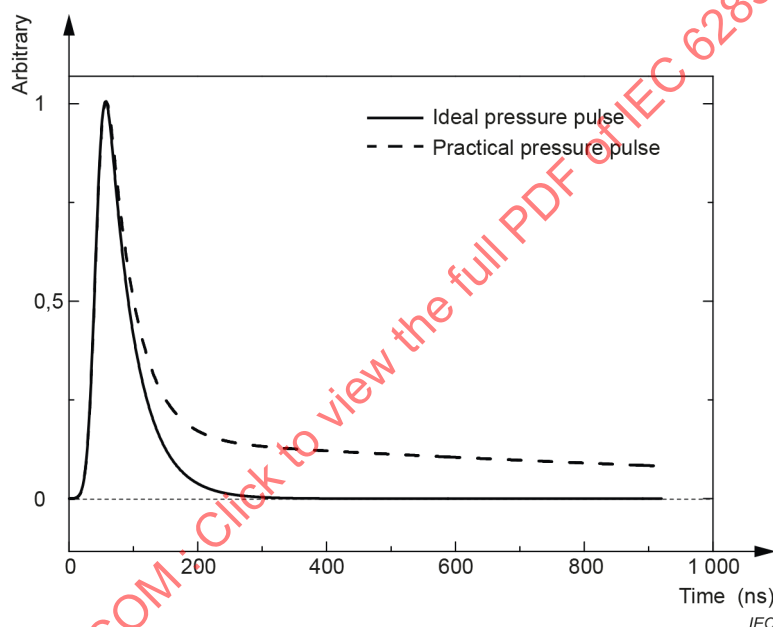


Figure A.1 – Comparison between practical and ideal pressure pulses

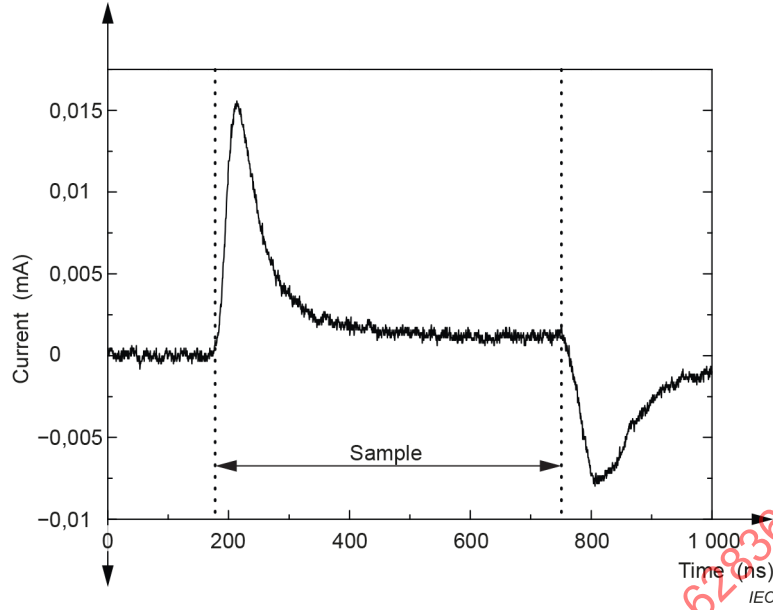


Figure A.2 – Original signal of the sample free of charge under moderate voltage

Though the resiliency effect is partially corrected by the procedure described in this document, an improved integration procedure can be used to obtain better electric field estimations. This improved integration procedure includes a correction of the laser-generated pressure pulse so as to remove the effect of resiliency.

A.2 Analysis of the resiliency effect and correction procedure

If the response of the target were perfect, the laser-generated pressure pulse would be an ideal pulse $p(t)$. In terms of linear systems, one can say that the impulse response of the target would be a Dirac function: $\delta(t)$. Owing to resiliency, the response of the target includes a slow process governed by an exponential law. Therefore, in addition to the ideal pulse $p(t)$, one obtains a slow decreasing offset. In terms of linear systems, one can say that the practical impulse response of the target is the sum of a Dirac and an exponential function: $\delta(t) + Ae^{-at}H(t)$, where A is the amplitude of the resiliency effect, $1/a$ is its time constant and $H(t)$ is the Heaviside function. In the Laplace space, the practical target transfer function is

$$F(s) = 1 + \frac{A}{s+a} = \frac{s+a+A}{s+a} \quad (\text{A.1})$$

The correction of the resiliency effect consists in compensating the dependence on s of the practical target transfer function. This can be done by multiplying the practical target transfer function with $1/F(s) = (s+a)/(s+a+A)$. Its inverse Laplace transform is

$$L^{-1}\left[\frac{1}{F(s)}\right] = \delta(t) - Ae^{-(a+A)t}H(t) \quad (\text{A.2})$$

where L^{-1} represents an operation of inverse Laplace transform.

The resiliency can then be corrected by the convolution of the measured signal with Formula (A.2). Since the integration corresponds to a division by s in the Laplace space, the correction and the integration can be performed at the same time. The inverse Laplace transform of $(s+a)/(s+a+A)/s$ is

$$h(t) = \left(1 - \frac{A}{a+A} \left(1 - e^{-(a+A)t} \right) \right) H(t) \quad (\text{A.3})$$

Therefore, the resiliency correction and the integration of the measured signal can be performed at the same time by the convolution of the measured signal with the function $h(t)$. It can be noticed that the first 1 in the parentheses corresponds to the simple integration. The other term except the first 1 in the parentheses corresponds to the resiliency correction.

A.3 Example of the correction procedure on a PE sample

The original reference signal is measured under a moderate electric field: 5 kV/mm. The peak of the original signal with noise has an obvious resiliency, as shown in Figure A.2. Figure A.3 shows the comparison between the original reference signal and the reference signal corrected by Formula (A.2). The corrected signal was obtained with coefficients $1/A = 537$ ns and $1/a = 1\,452$ ns.

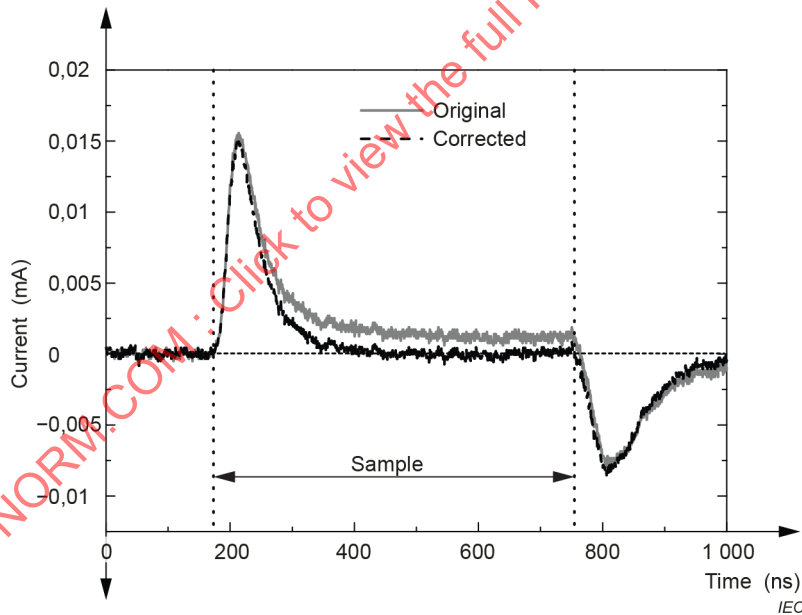


Figure A.3 – Comparison between original and corrected reference signals with a sample free of charge under moderate voltage

The signal of the sample with space charge can be corrected and integrated at the same time with $h(t)$, taking the same coefficients as the reference signal. Applying the calibration described in this document leads to the results shown in Figure A.4 for both simple integration and corrected integration.

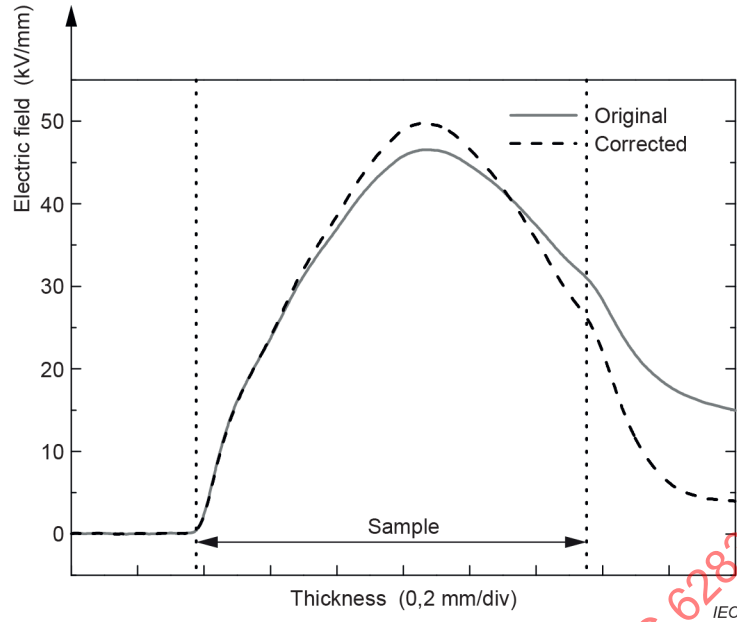


Figure A.4 – Electric field in a sample under voltage with space charge calculated from original and corrected signals

Though resiliency introduces a drift with the simple integration procedure, the drift is partially compensated in the sample with the calibration (see Clause C.3) described in this document. However, the corrected integration procedure gives more accurate results.

A.4 Estimation of the correction coefficients

Coefficients a and A in Formulae (A.1), (A.2) and (A.3) can be calculated from the geometrical characteristics of the reference signal (see Figure A.5). If A_m and t_m are respectively the amplitude and time of the maximum of the peak, the resiliency after $t_m + 2T_p$ can be fitted by the linear function $q(t)$:

$$q(t) = A_r - a_r (t - t_m) \quad (\text{A.4})$$

where A_r is the amplitude at time $t = t_m$ with slope $-a_r$ and the width of the pulse T_p at the amplitude $A_m / 2 + A_r / 4$. Then one has

$$A = \frac{2A_r}{(2A_m - A_r)T_p} \quad \text{and} \quad a = \frac{a_r}{A_r} \quad (\text{A.5})$$

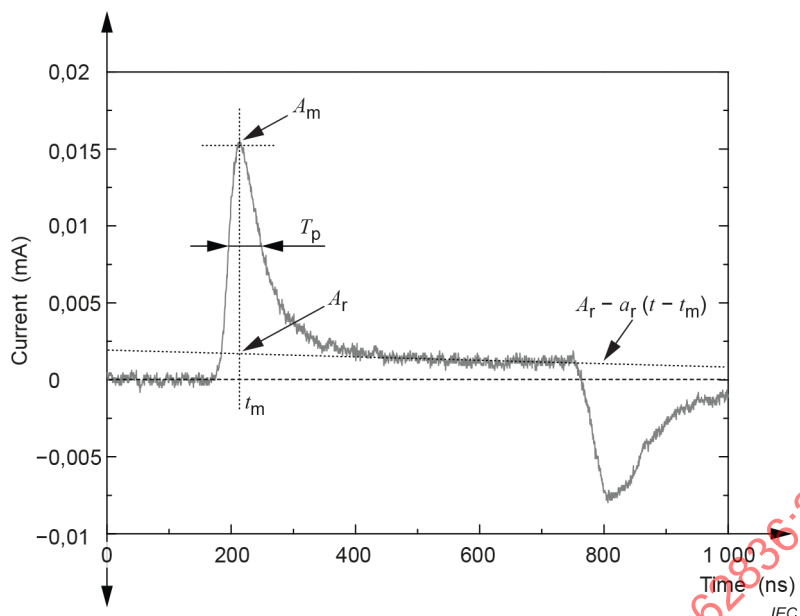


Figure A.5 – Geometrical characteristics of the reference signal for the correction coefficient estimation

In the case of the signal presented in Figure A.3, the values of coefficients are as follows:

$$A_m = 3,05 \mu\text{A};$$

$$A_r = 0,31 \mu\text{A};$$

$$1/a_r = 4\,670 \text{ ns}/\mu\text{A};$$

$$1/a = 1\,452 \text{ ns};$$

$$1/A = 357 \text{ ns};$$

$$T_p = 57,8 \text{ ns}.$$

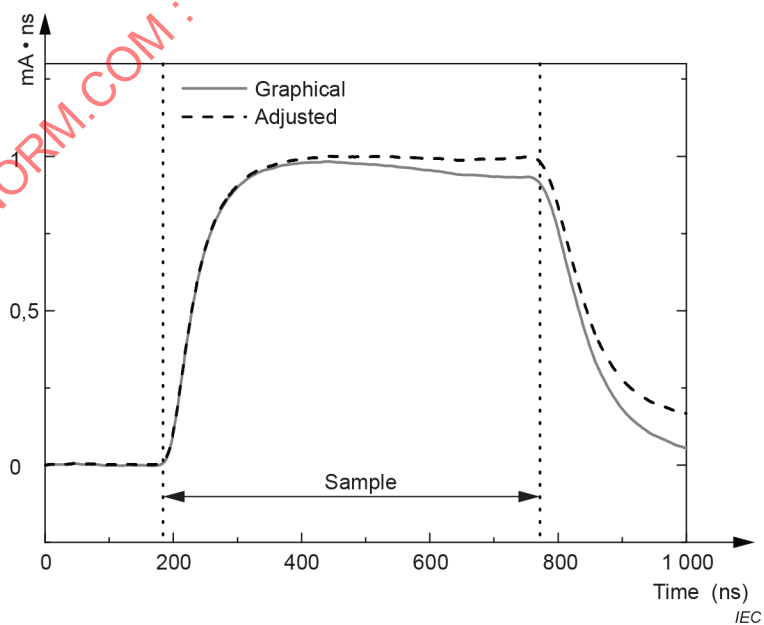


Figure A.6 – Reference signal corrected with coefficients graphically obtained and adjusted

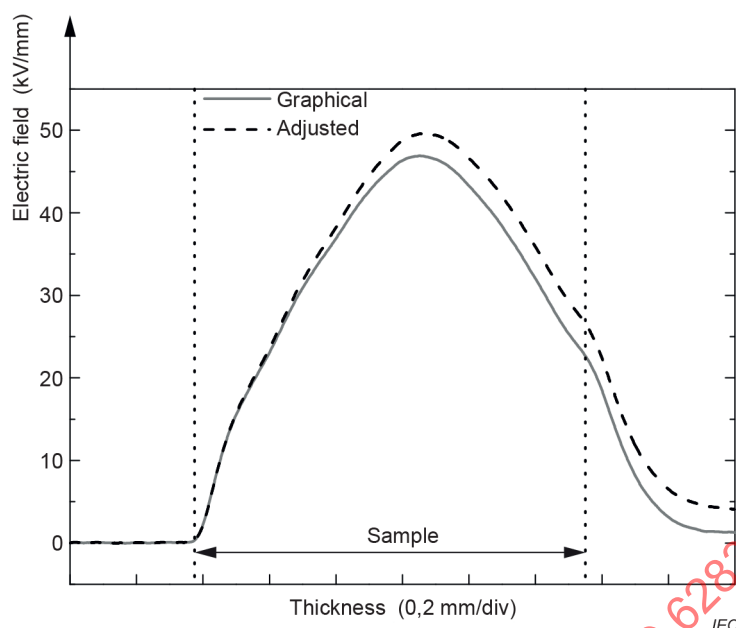


Figure A.7 – Electric field in a sample under voltage with space charge calculated with graphically obtained coefficient and adjusted coefficient

It can be noticed that correction is not very sensitive to coefficients a and A , so they do not have to be precisely estimated. Figure A.6 presents the corrected reference signal obtained from the original signal in Figure A.5. Figure A.7 presents the calibration by the former values of the coefficient A with $1/A = 537$ ns and $1/A = 688$ ns, respectively. A variation of 22 % of coefficient A induces here only a variation of 3,3 % of the electric field.

A.5 MATLAB[®] code

A variant of the symbols used in the above text is adopted in order to make them available and avoid confusion in the MATLAB[®] code. The symbols and their corresponding variants are shown in Table A.1.

Table A.1 – Variants of symbols used in the text

Symbols in the text	A_m	t_m	A_r	a_r	T_p	E_0
Corresponding variant in the code	Am	tm	Ar	ar	Tp	E0

Let ref be the reference signal (in row) and let sig be the signal (in row) from which to calculate the electric field in the sample. The length of these signals is N . Let A_m and t_m be respectively the amplitude and time of the maximum of the first peak of ref and A_r and a_r the linear function $A_r - a_r * (t - t_m)$ that fits the resiliency in ref . Finally let T_p be the ref pulse width at the amplitude $A_m/2 + A_r/4$ and E_0 the moderate electric field under which the reference signal was acquired. The corrected and integrated signals c_{ref} and c_{sig} respectively obtained from ref and sig are calculated by

1 MATLAB is the registered trademark of a product supplied by The MathWorks Inc. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of the product named.

```

A = 2*Ar/(2*Am-Ar)/Tp;
a = ar/Ar;
cref = conv(ref,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
cref = cref(1:N);
csig = conv(sig,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
csig = csig(1:N);

```

The electric field is then calculated from c_{sig} and c_{ref} with

$$E = E_0 * c_{sig} / c_{ref}.$$

Obviously, this calculation is valid only for the sample. It indeed diverges when c_{ref} goes to zero. In order to obtain better results, the plateau of c_{ref} can be interpolated with a linear function. Let id1 and id2 be two points of the c_{ref} plateau, id1 closer to the beginning of the sample and id2 close to the end of the sample. The interpolation ic_{ref} of c_{ref} and the resulting electric field are then obtained by

```

icref = polyval(polyfit(id1:id2,cref(id1:id2),1),1:N);
E = E0*csig/icref.

```

Instead, coefficient A can be optimized in order to have a flat plateau for c_{ref} and thus a single constant for the division. Coefficient A can be optimized for instance by

```

x = fminunc(@(x)Criteria(x,A,a,ref,id1:id2),1);
A = x*A;
cref = conv(ref,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
cref = cref(1:N);
E = E0*csig/cref(id2);

```

with

```

function xs = Criteria(x,A,a,r,t)
rc = conv(r,x*A*exp(-(x*A+a)*(0:length(r)-1)));
rc = r-rc(1:length(r));
xs = mean(abs(rc(t))).

```

Annex B (informative)

Linearity verification of the measuring system

B.1 Linearity verification

The linearity verification of the measuring system can be done at any time and at any temperature if it is necessary, or within a certain period, for example one year at least. The proposed minimum limitation of linearity by the linear correlation coefficient for the PWP method is 0,980. If the linearity of the measuring system is lower than the limitation, it is necessary to check the measuring system.

B.2 Sample conditions

A 1,0 mm thick poly methyl methacrylate (PMMA) plate with 0,6 mm thick carbon loaded EVA plates thermally bonded on both sides is used in the linearity measurement. The measuring method is the same as the method described in Clause 7 and Clause 9.

B.3 Linearity verification procedure

- 1) The PMMA sample is short-circuited for about 4 h at a given temperature. The electrodes of each sample are connected together to eliminate the effect of residual charges prior to the test.
- 2) Before the measurement, several laser shots are applied to the target to remove possible dust on the electrode surface.
- 3) A signal without applying DC voltage should be measured to confirm the absence of any space charge in the sample. If any space charge is observed, a preheating treatment on the sample (e.g. the sample is short-circuited at 40 °C over 4 h) is needed before the next step. Multiple measurements for signal averaging are necessary for increasing the S/N (signal to noise ratio) of the signal. Two separate laser shots for averaging are suggested and the duration between the two shots is about 2 s, the same as in this Clause B.3.
- 4) The signals under DC voltages of 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV and 40 kV are successively measured. After each measurement, the applied voltage is quickly reduced to zero. The time interval between each measurement is about 1 min.

B.4 Example of linearity verification

The measured voltage signals after the amplifier are shown in Figure B.1 for the applied DC voltages of 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV and 40 kV. Figure B.2 shows the measured current signals induced from the sample and an amplifier is used in the measuring system.

According to Equation (11), for a sample free of charge in the bulk, the electric field is proportional to the electrode current peak value. Annex A shows that a correction procedure shall be carried out on the measured current signal before the calibration process, due to the resiliency effect. However, there is almost no change in the first electrode peak value after the correction procedure, as shown in Figure A.3. Therefore, the peak amplitude of the measured current at the first electrode can be used directly for the linearity verification of the measuring system. Figure B.3 shows the relationship between the peak amplitude of the measured current at the first electrode and the applied voltage. A linear fit of the peak amplitude of the measured current at the first electrode is also shown in Figure B.3 with applied voltage. In addition, the linear correlation coefficient in this example is 0,999.

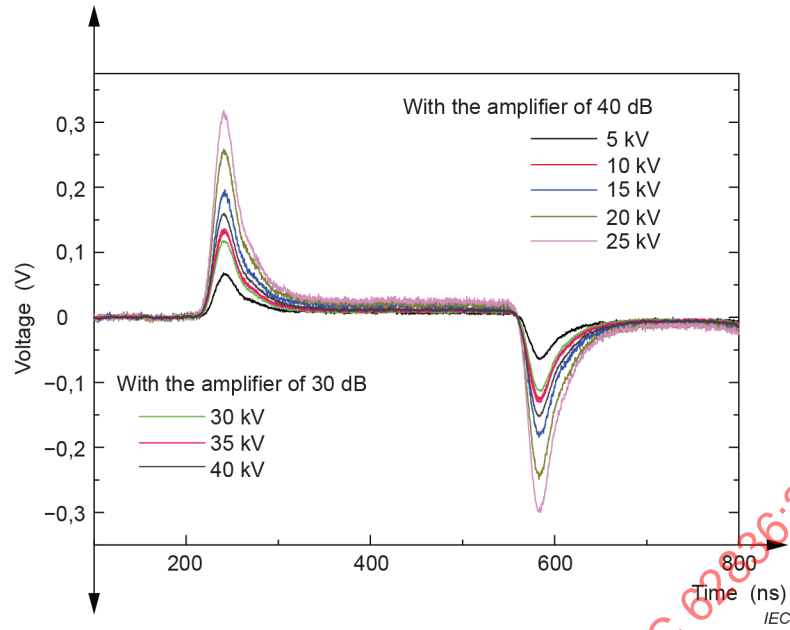


Figure B.1 – Voltage signals obtained from the oscilloscope by the amplifier with different amplifications

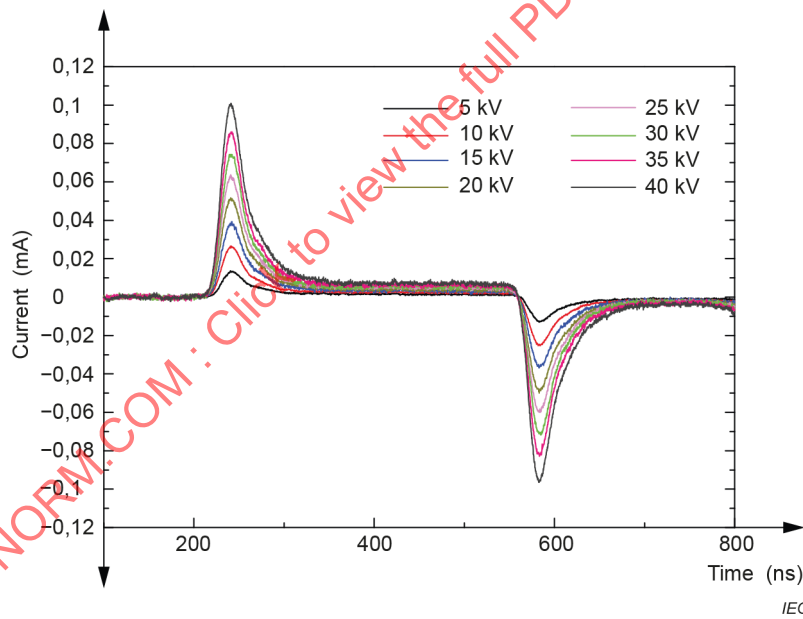


Figure B.2 – Current signals induced by the sample, considering the input impedance and the amplification of the amplifier

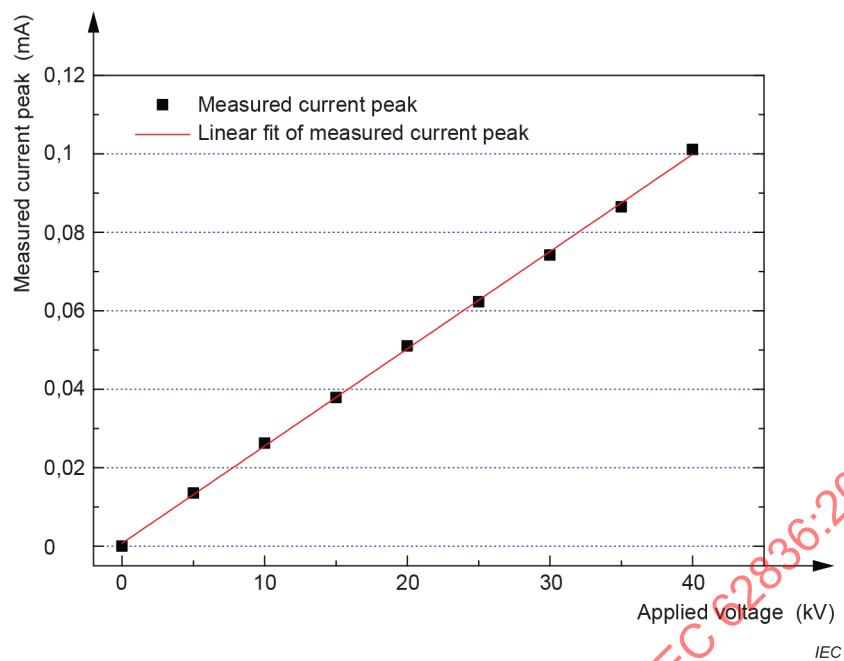


Figure B.3 – Relationship between the measured current peak of the first electrode and applied voltage

Annex C (informative)

Measurement examples for planar plaque samples

C.1 Samples

A low density polyethylene (LDPE) plaque sample with a 1,16 mm thickness and a 20 cm diameter is used. The EVA+CB electrodes with a 0,6 mm thickness and a 5 cm diameter are attached on the LDPE sample by hot-press. In this example, the calibrating sample and testing sample are the same sample.

C.2 Pressure pulse generation

A laser pulse with a 500 mJ energy and 6 ns duration produced by a Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet) pulsed laser, radiates on the EVA+CB electrode directly. It introduces the pressure pulse wave in the sample by the plasma ablation on the electrode surface. Since the acoustic impedance is very similar for the LDPE sample and for the EVA+CB electrode, the reflection on the interface between LDPE and EVA+CB can be ignored.

C.3 Calibration of sample and signal

Measurements and calibration should be done at the same temperature depending on the materials and their application. Here, it is recommended to set the experiments at 40 °C but not at room temperature, because room temperature can fluctuate. Under the temperature of 40 °C, a relatively low voltage (–5,8 kV) is applied to the sample. The signal is measured shortly after the application of the voltage, for example within 1 min. The internal electric field is 5 kV/mm for this sample. Knowing the sample thickness and the transit time, which can be determined by the time between the beginnings of two peaks, the sound velocity can be obtained from the measured signal, $v_s = 2\,017$ m/s.

After the above measurements, the signal without applied DC voltage may be measured to confirm the absence of any space charge in the sample. See also Clause B.3.

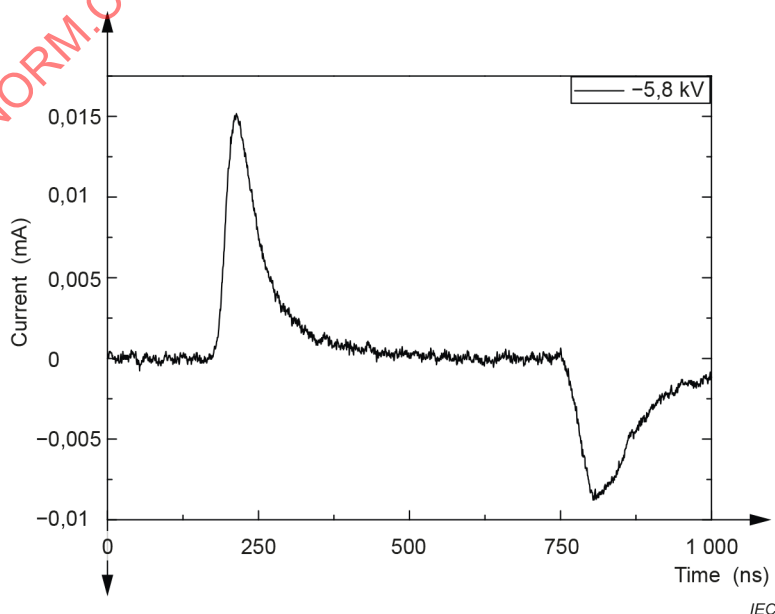


Figure C.1 – Measured current signal under –5,8 kV

The preconditional method of the original signal can be found in Annex A. The linearity verification of the measuring system can be done at any time if it is necessary, or within a certain period, for example one year at least. The method for the linearity verification can be found in Annex B.

C.4 Testing sample and experimental results

C.4.1 Measurement results

Under the same temperature, a relative high voltage ($-46,4$ kV) is applied to the same sample for 1,5 h. The evolution of the signal is measured. The applied internal electric field is 40 kV/mm (see Figure C.2 and Figure C.4).

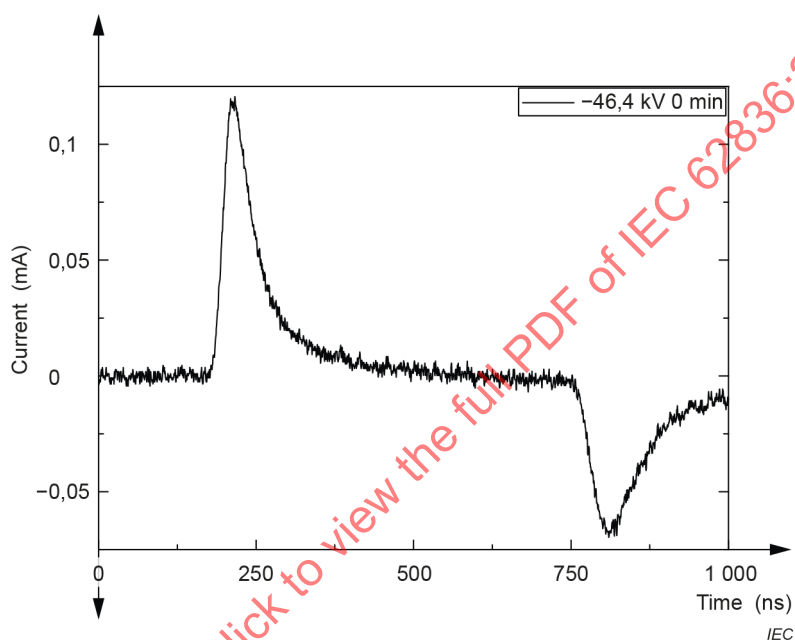


Figure C.2 – First measured current signal (< 1 min)

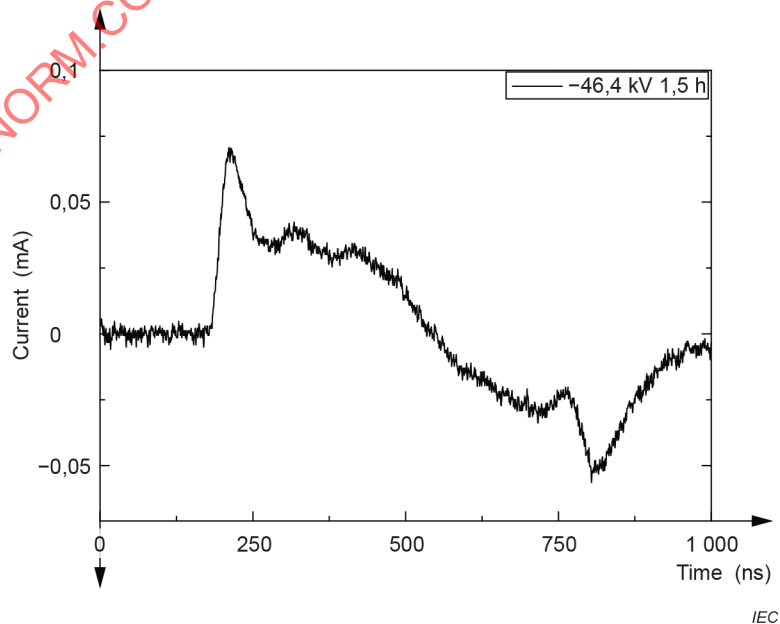


Figure C.3 – Measured current signal after 1,5 h under $-46,4$ kV

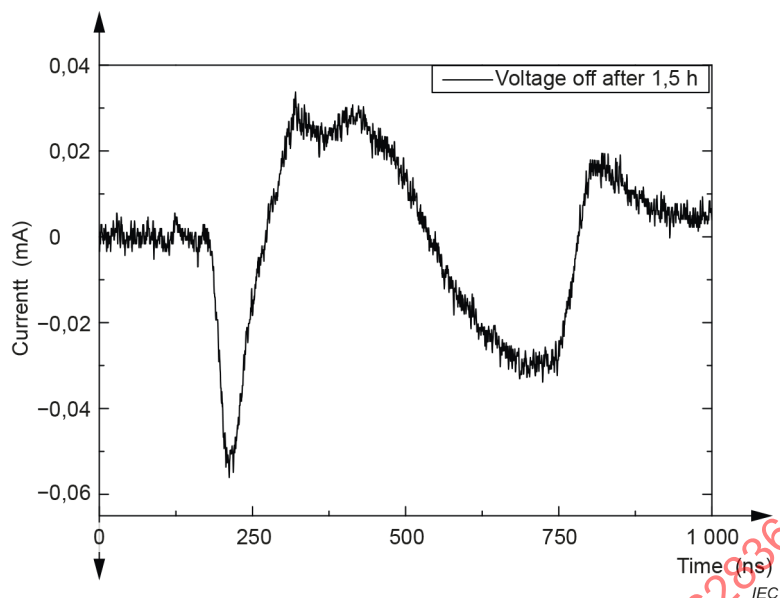


Figure C.4 – Measured current signal without applied voltage after 1,5 h under -46,4 kV

For this sample, at the beginning of the applied voltage, there is no space charge in the sample but only charges on the electrodes. After a while, there are space charges injected into the sample from both electrodes. When the voltage is switched-off (Figure C.4), certain space charges remain in the insulating material and also charges on the electrodes adapted to the short-circuit condition across the sample.

C.4.2 Internal electric field distribution in the testing sample

Figure C.5, Figure C.6, Figure C.7, and Figure C.8 show the electric field distribution for the various voltages.

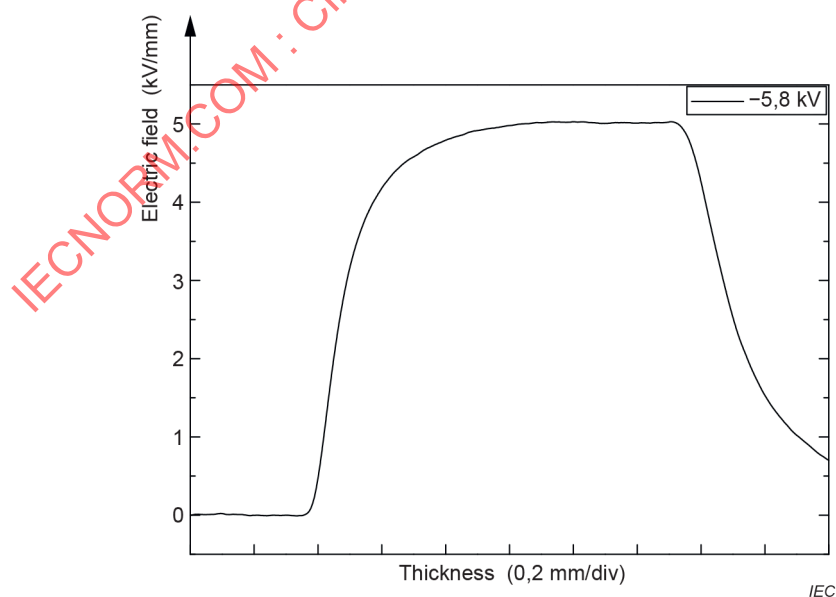


Figure C.5 – Internal electric field distribution under -5,8 kV

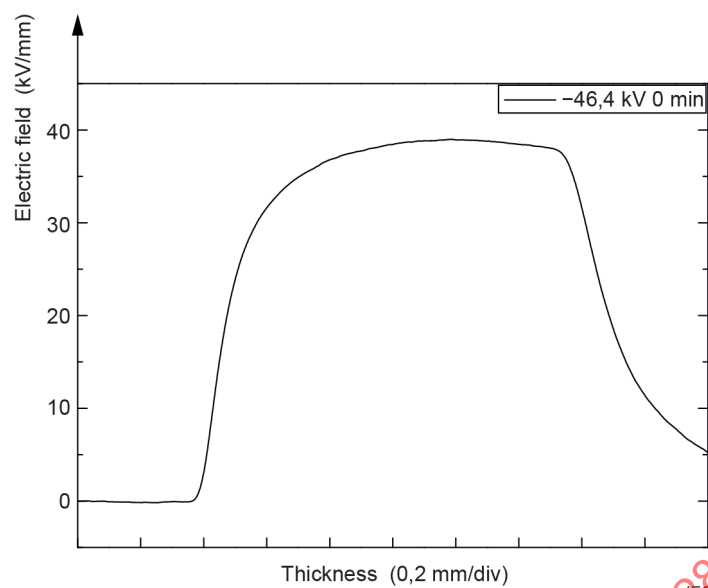


Figure C.6 – Internal electric field distribution under -46,4 kV, at the initial state

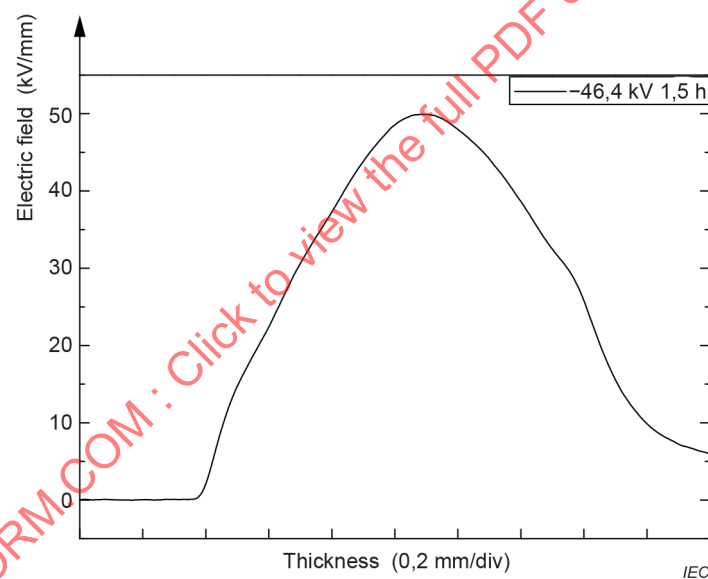


Figure C.7 – Internal electric field distribution after 1,5 h under -46,4 kV

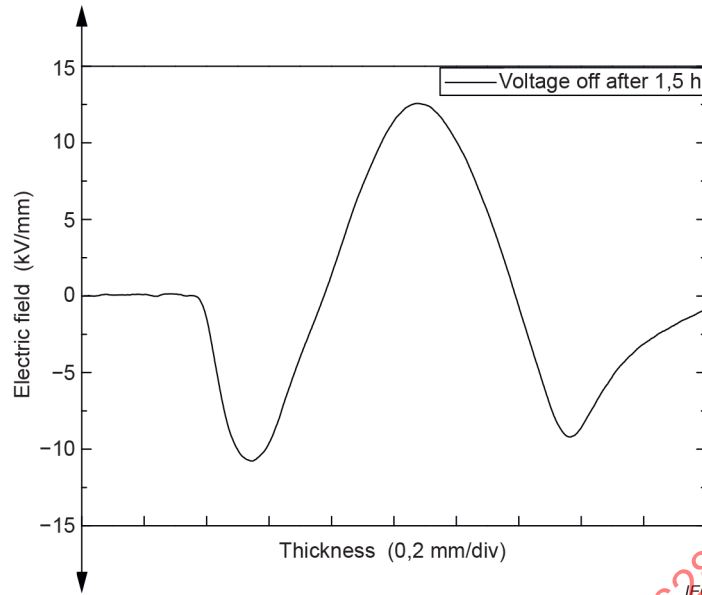


Figure C.8 – Internal electric field distribution without applied voltage after 1,5 h under -46,4 kV

From the raw measurements (Figure C.1 and Figure C.2), signals are processed according to the treatments described in Equation (12) into Figure C.5 and Figure C.6. There is no space charge in the sample and the electric field is uniform, i.e., it is dependent on the applied voltage divided by the thickness of the sample. In Figure C.7, the injected charges under the applied voltage modify the field distribution with a large amount in the middle of the sample. Without the applied voltage (Figure C.8), the distribution of the electric field in the middle of the sample is still large due to the presence of space charge in the sample.

C.4.3 Distribution of space charge density in the testing sample

From the measured current in Figure C.1 with the lower applied voltage, the constant γ can be obtained by Equation (13) as follows:

$$\gamma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{v_s} \cdot \frac{E_0}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} = 38,5 \left(\frac{\mu\text{C}/\text{cm}^3}{\text{mA}} \right)$$

where $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m, $\epsilon_r = 2,0$, $v_s = 2\,017$ m/s, $E_0 = 5$ MV/m. With the constant γ , the distributions of space charge density shown in Figure C.9 and Figure C.10, which are from Figure C.3 and Figure C.4, can be obtained.

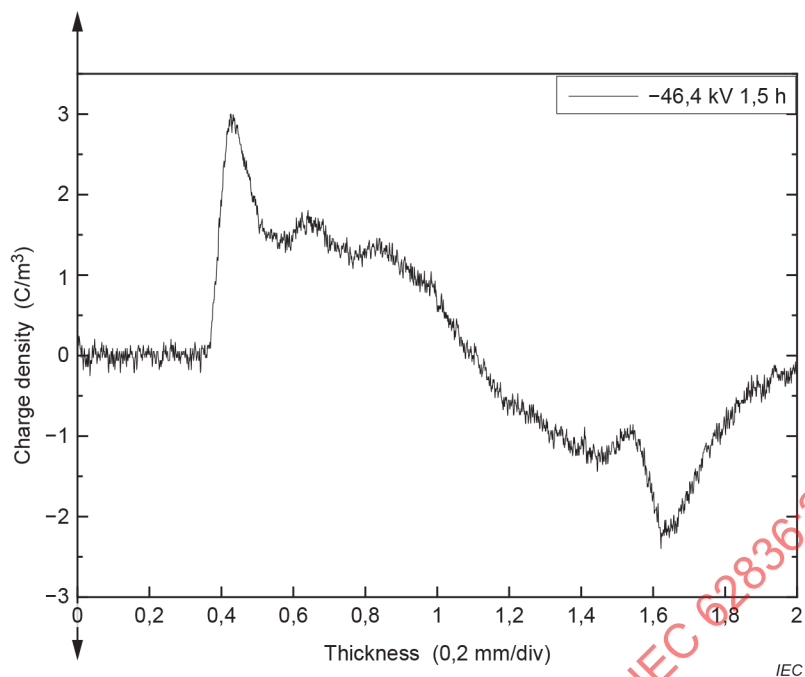


Figure C.9 – Space charge distribution after 1,5 h under -46,4 kV

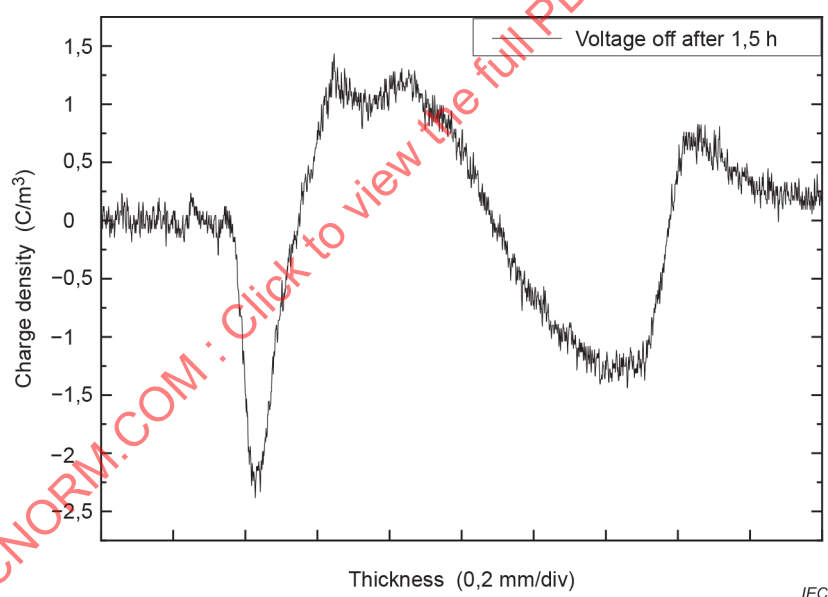


Figure C.10 – Space charge distribution without applied voltage after 1,5 h under -46,4 kV

Annex D (informative)

Measurement examples for coaxial geometry samples

D.1 Example of linearity verification of coaxial geometry

D.1.1 Sample conditions

Because it is difficult to prepare the coaxial geometry sample with uniform poly methyl methacrylate (PMMA) as described in Clause B.2, the sample used for testing can also be used for the coaxial sample for calibration. In the example, the coaxial sample is a shortened extruded cable with LDPE with a 5,0 mm inner radius and a 9,5 mm outer radius of insulation, 4,5 mm thick insulation of LDPE, and with a 1 mm thick carbon loaded EVA layer on both surfaces of insulation. The semiconducting layer (carbon loaded EVA layer) at both ends of the sample has been removed over a length of 30 cm to avoid the occurrence of flashovers and discharge. The measuring method is the same as the method described in Clause 7 and 13.4.

D.1.2 Linearity verification procedure

- 1) The shortened extruded LDPE cable is short-circuited for about 4 h at a given temperature.
- 2) Before the measurement, several laser shots are applied to the target to remove possible dust and grease on the outer electrode surface.
- 3) A signal without applied DC voltage shall be measured to confirm the absence of any space charge in the sample. In that case, the signal presents no deviation from the baseline. If any space charge is observed, a preheating treatment on the sample (e.g. the sample is short-circuited at 40 °C over 4 h) shall be done before the next step. Multiple measurements for signal averaging are necessary for increasing the S/N (signal to noise ratio) of the signal. Two separate laser shots for averaging are suggested and the duration between the two shots is about 2 s, the same as in this Subclause D.1.2.
- 4) The signals under DC voltages of +22,5 kV, –45 kV, –67,5 kV and –90 kV, are successively measured. After each measurement, the applied voltage is quickly reduced to zero. The time interval between each measurement is about 1 min.

D.1.3 Example of linearity verification

The measured current signals induced from the testing LDPE coaxial sample with 4,5 mm thickness insulation are shown in Figure D.1 for the applied DC voltages of –22,5 kV, –45,0 kV, –67,5 kV and –90 kV, which relate to the applied electric fields of 5 kV/mm, 10 kV/mm, 15 kV/mm and 20 kV/mm.

According to Equation (16) and Equation (17) with the limitation of measuring conditions in 13.3, for a sample free of charge in the bulk, the peak value of the current signal should be proportional to the applied field. Therefore, the peak amplitudes of measured current at the outer electrode (for the first peak) and the inner electrode (for the second peak) can be used directly for the linearity verification of the measuring system. Figure D.2 shows the relationships between the peak amplitude of the measured current at the outer and inner electrode and the applied voltage respectively. The linear fits of the peak amplitude of the measured current at the outer electrode and inner electrode (first and second peak) are also shown in Figure D.2 with applied voltage. In addition, the linear correlation coefficients R^2 in this example are 0,997 for the inner electrode and also 0,997 for the outer electrode respectively.

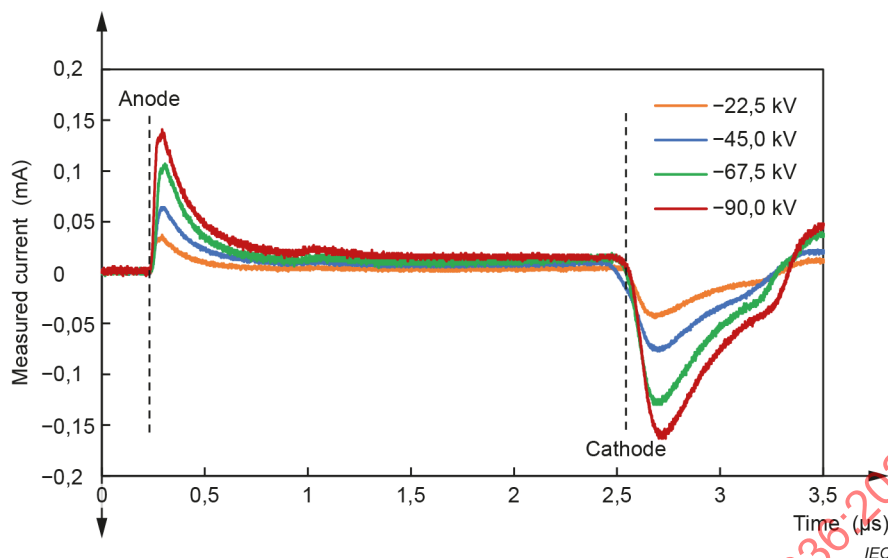


Figure D.1 – Measured currents from the LDPE coaxial sample under different applied voltages in a few minutes

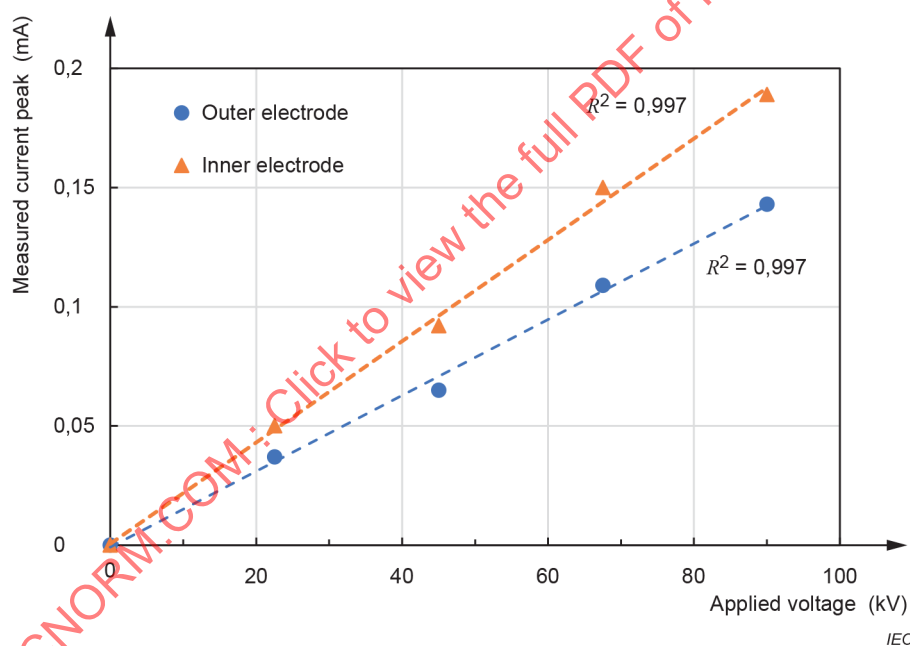


Figure D.2 – Relationships between the peak amplitude of the measured current at outer and inner electrodes and applied voltage

D.2 Verification of the current peak area ratio between the outer and inner electrodes

D.2.1 Verification principle

According to Equation (18) in 13.2, for a sample free of charge in the bulk, with the limitation of measuring conditions in 13.3, the ratio between the current peak values at the outer and inner electrodes should follow in the 3/2 power relation with the radius ratio between the outer and inner electrodes. Therefore, the ratio can be used as the validity verification of space charge measurement for a coaxial sample. Avoiding the impact of acoustic dispersion in thick insulation, the peak value of measured current is replaced by the integral area of current peak.

D.2.2 Example of verification of the current peak area ratio

The coaxial sample is used for the verification of the current peak area ratio, with the inner insulation radius of 5,0 mm, the outer insulation radius of 9,5 mm, and the thickness of insulating layer of 4,5 mm. Therefore, its theoretical ratio of current peaks is on 2,61. Table D.2 shows the ratios from the measured current signals in Figure D.1 for the coaxial sample. For the testing coaxial sample, the inconsistency of verification is between –8 % to +6 %, which is better than the request in 13.4.2.

Table D.2 – Analysis of ratio between theoretical and measured peak area for measured current signal

Applied voltage kV	Theoretical ratio of current (b)	Integral area of the current signal at the inner electrode $\mu\text{A} \cdot \mu\text{s}$	Integral area of the current signal at the outer electrode $\mu\text{A} \cdot \mu\text{s}$	Actual ratio between inner and outer electrodes current (a)	Ratio between actual (a) and theoretical (b)
22,5	2,61	15,3	5,9	2,59	0,99
45	2,61	29,8	10,7	2,78	1,06
67,5	2,61	47,2	18,4	2,55	0,97
90	2,61	62,5	26,3	2,41	0,92

D.3 Testing sample and experimental results

D.3.1 Raw results of measurements

For calibration, the first current signal is measured shortly after the application of lower voltage with 1 min. The first measured current signal under 22,5 kV is shown in Figure D.3.

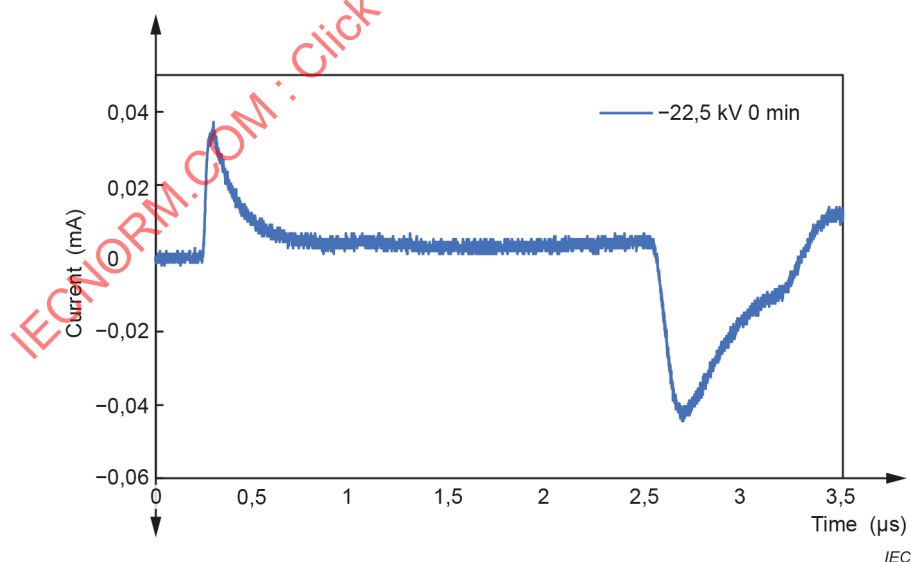


Figure D.3 – First measured current signal (< 1 min) for the coaxial sample

At room temperature, a higher voltage (-90 kV) is applied to the same coaxial sample for 2 h. The average electric field is 20 kV/mm . The evolution of the signal is measured, as shown in Figure D.4.

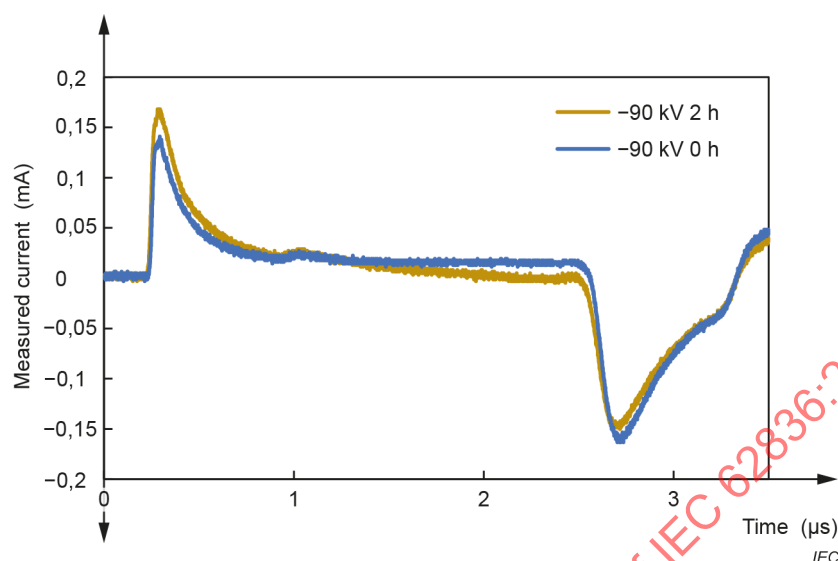


Figure D.4 – Measured current signals for the coaxial sample at beginning and after 2 h under $-90,0\text{ kV}$

For this coaxial sample, at the beginning of the applied voltage, there is almost no space charge in the sample but there are charges on both electrodes (the blue line in Figure D.4). After a while, there are some hetero-charges near the anode (outer electrode) and some homo-charges near the cathode (inner electrode) which induce the first peak and reduce the second peak. When the voltage is switched-off (Figure D.5), the space charges remain in the insulating materials as well as the charges induced on the electrodes according to the short-circuit condition across the coaxial sample. The amount of space charge in the coaxial sample is in the order of $0,01\text{ C/m}^3$.

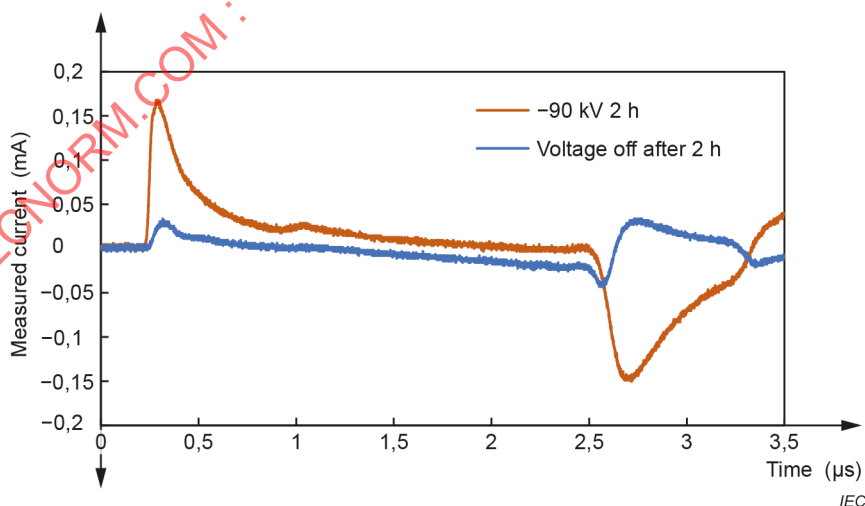


Figure D.5 – Measured current signals for the coaxial sample after 2 h under $-90,0\text{ kV}$, and without applied voltage after 2 h under high voltage

D.3.2 Electric field distribution in the coaxial sample

The ideal electric field distributions can be obtained by the following equation:

$$E(r) = \frac{U}{r} \cdot \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \quad (\text{D.1})$$

where U is the applied voltage on the coaxial sample, r_i and r_o are the radii of the inner electrode and outer electrode respectively, and $E(r)$ is the internal electric field distribution with position r . Figure D.6, Figure D.7, Figure D.8 and Figure D.9 show the electric field distribution for the various applied voltages, including no voltage applied (i.e. switch-off).

The method of retrieving the measured electric distribution from the raw measured current signal can be found in 13.4.3. The measured electric field distributions in Figure D.6 and Figure D.7 without space charge should be the same as the ideal electric field obtained from Equation (D.1). Figure D.8 shows the electric field distribution with space charge, so that it is obviously different between the measured results and the ideal distribution.

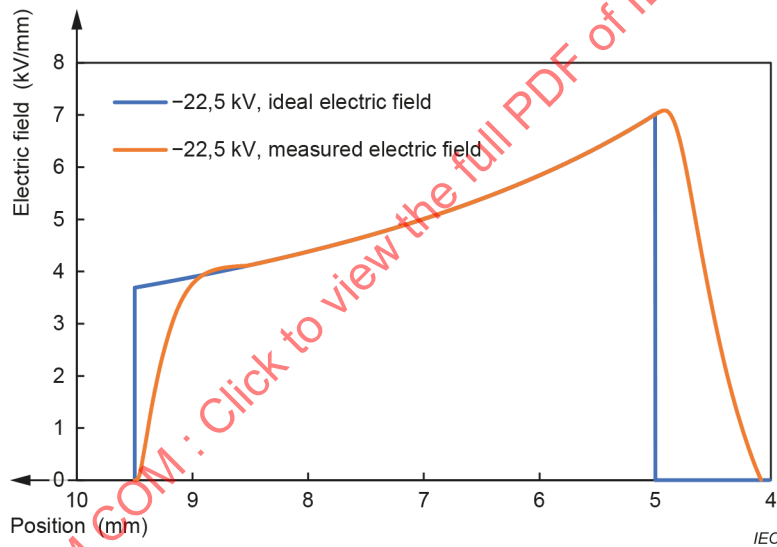


Figure D.6 – Internal electric field distribution under –22,5 kV for the coaxial sample

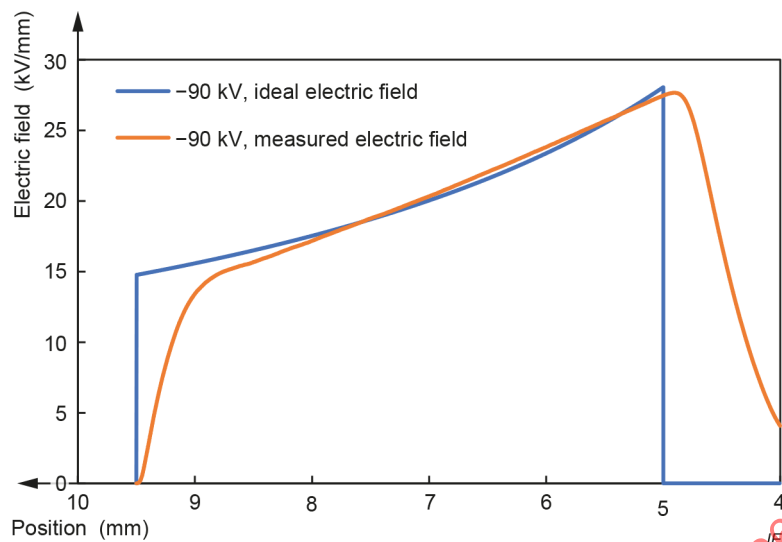


Figure D.7 – Internal electric field distribution under $-90,0$ kV for the coaxial sample, at the initial state

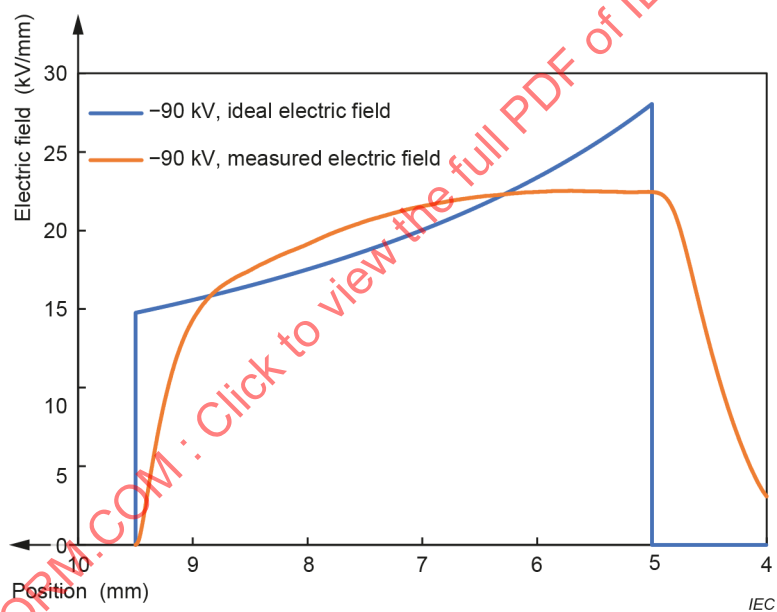


Figure D.8 – Internal electric field distribution after 2 h under $-90,0$ kV

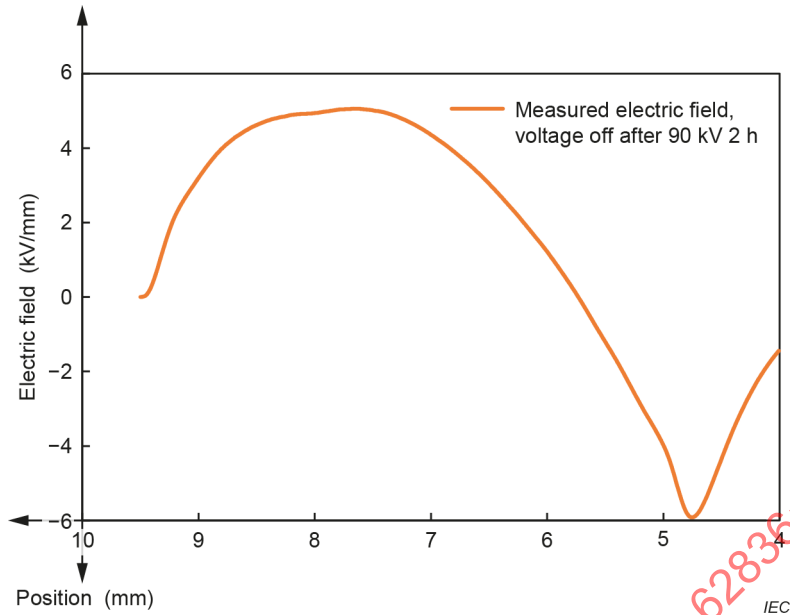


Figure D.9 – Internal electric field distribution without applied voltage after 2 h under -90,0 kV

From the raw measurements (signals in Figure D.3 and Figure D.4), electric field distributions in the coaxial sample can be obtained as shown in Figure D.6, Figure D.7 and Figure D.8, according to the treatments described in Clause A.1 and 13.2. There are few space charges in the coaxial sample so that the electric field is close to the ideal distribution in Figure D.6 and Figure D.7. However, a few space charges under the applied voltage modify the electric field distribution in Figure D.8. Without the applied voltage (Figure D.9), there is still an electric field about ± 4 kV/mm due to the presence of space charge in the coaxial sample.

D.3.3 Space charge distribution in the coaxial sample

According to Poisson's equation for coaxial geometry, the space charge distribution in this case is:

$$\rho(r) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{r} \left[\frac{\partial E(r)}{\partial r} + E(r) \right] \quad (\text{D.2})$$

where $\rho(r)$ is the space charge density distribution with the position r , $E(r)$ is the internal electric field distribution with position r , and $\epsilon_0 \epsilon_r$ is the permittivity of the insulation. By using Equation (D.2), the space charge distribution can be obtained from Figure D.8 and Figure D.9 easily. Figure D.10 shows space charge distributions with and without an applied high voltage after it is under 90,0 kV for 2 h.

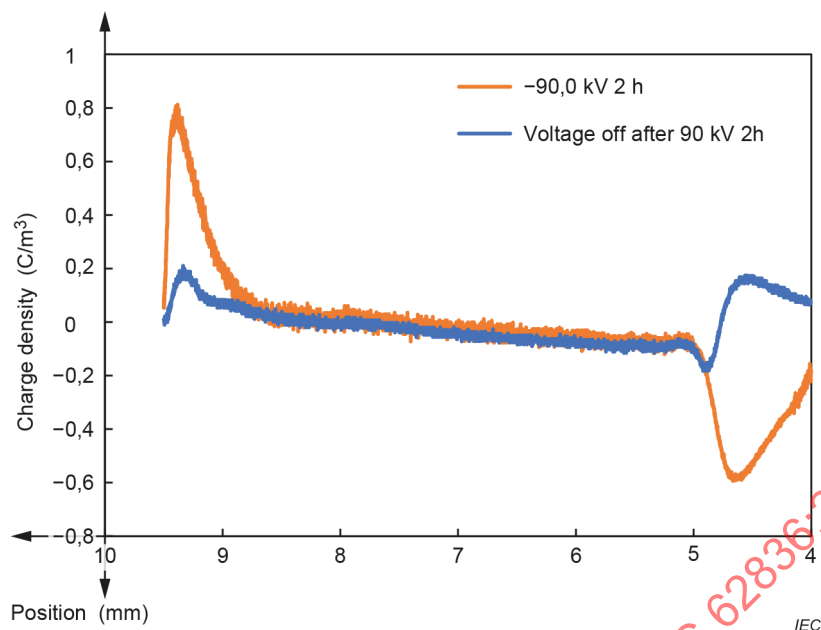


Figure D.10 – Space charge distribution with and without applied voltage after 2 h under -90,0 kV

In Figure D.10, it is shown that there are a few hetero-charges near the anode, and a few homo-charges near the cathode. Therefore, the electric field increases near the anode and decreases near the cathode.

Bibliography

C. Alquie, G Dreyfus, and J. Lewiner, "*Stress-wave probing of electric field distribution in dielectrics*", Phys. Rev. Lett., vol.47, no.20, pp.1483-1487, 1981

G. M. Sessler, J. E. West, G. Gerhard, "*High-resolution laser-pulse method for measuring charge distributions in dielectrics*", Phys. Rev. Lett., vol.48, no.8, pp.563-566, 1982

Jacques Lewiner, Stéphane Holé and Thierry Ditchi, "*Pressure wave propagation methods: a rich History and a bright Future*", IEEE Trans, on DEI, vol. 12, no.1, pp.114-126, 2005

Stephane Holé, Thierry Ditchi, and Jacques Lewiner, "*Influence of divergent electric field on space charge distribution measurements by elastic methods*", Phys. Rev. B., vol.61, no.20, pp.13528-13539, 2000

Yali Sun, Yewen Zhang, Stephane Hole, et al., "*Pressure wave propagation method for space charge measurement in coaxial geometry*", IEEE Trans, on DEI, vol. 25, no.6, pp.2139-2146, 2018

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	51
INTRODUCTION.....	53
1 Domaine d'application	54
2 Références normatives	54
3 Termes, définitions et abréviations	54
3.1 Termes et définitions	54
3.2 Abréviations.....	54
4 Principe de la méthode	55
5 Échantillons.....	58
6 Matériaux d'électrodes.....	58
7 Génération de l'impulsion de pression	58
8 Montage de mesure	59
9 Étalonnage du champ électrique.....	60
10 Procédure de mesure	60
11 Traitement des données pour les mesurages expérimentaux.....	61
12 Mesurage de la répartition des charges d'espace	62
13 Influence de la géométrie coaxiale.....	62
13.1 Montage de mesure pour la méthode de l'onde de pression dans le cas d'un échantillon à géométrie coaxiale	62
13.2 Modèle physique à géométrie coaxiale.....	63
13.3 Conditions de mesure	65
13.4 Étalonnage du champ électrique dans le cas d'un échantillon coaxial	66
13.4.1 Récapitulatif	66
13.4.2 Vérification de la linéarité	66
13.4.3 Vérification de la validité du rapport entre deux pics de courant.....	66
13.4.4 Méthode de déduction du champ électrique interne à partir du signal de courant mesuré.....	66
Annexe A (informative) Méthode de préconditionnement du signal d'origine pour la méthode PWP sur un échantillon plan.....	68
A.1 Limite d'intégration simple	68
A.2 Analyse de l'effet de résilience et procédure de correction de la résilience	69
A.3 Exemple de procédure de correction sur un échantillon en PE	70
A.4 Estimation des coefficients de correction	71
A.5 Code MATLAB®.....	73
Annexe B (informative) Vérification de la linéarité du système de mesure	75
B.1 Vérification de la linéarité	75
B.2 Conditions d'échantillonnage	75
B.3 Procédure de vérification de la linéarité	75
B.4 Exemple de vérification de la linéarité.....	75
Annexe C (informative) Exemples de mesurages pour les échantillons plans de type plaque	78
C.1 Échantillons	78
C.2 Génération de l'impulsion de pression.....	78
C.3 Étalonnage de l'échantillon et du signal	78
C.4 Échantillon d'essai et résultats expérimentaux	79
C.4.1 Résultats de mesure	79

C.4.2	Répartition du champ électrique interne dans l'échantillon d'essai	80
C.4.3	Répartition de la densité volumique des charges d'espace dans l'échantillon d'essai.....	83
Annexe D (informative) Exemples de mesurages sur des échantillons à géométrie coaxiale		85
D.1	Exemple de vérification de la linéarité pour la géométrie coaxiale	85
D.1.1	Conditions d'échantillonnage	85
D.1.2	Procédure de vérification de la linéarité	85
D.1.3	Exemple de vérification de la linéarité.....	85
D.2	Vérification du rapport des aires des pics de courant entre les électrodes extérieure et intérieure	86
D.2.1	Principe de vérification	86
D.2.2	Exemple de vérification du rapport des aires des pics de courant.....	87
D.3	Échantillon d'essai et résultats expérimentaux	87
D.3.1	Résultats de mesure bruts	87
D.3.2	Répartition du champ électrique dans l'échantillon coaxial.....	88
D.3.3	Répartition des charges d'espace dans l'échantillon coaxial	91
Bibliographie.....		93
Figure 1 – Schéma de principe de la méthode PWP		57
Figure 2 – Montage de mesure pour la méthode PWP.....		59
Figure 3 – Échantillon de circuit visant à protéger l'amplificateur contre les dommages dus à une faible décharge sur l'échantillon.....		59
Figure 4 – Schéma du montage de mesure pour la méthode de l'onde de pression dans le cas d'un échantillon coaxial		63
Figure 5 – Schéma de propagation des ondes selon la méthode PWP dans le cas d'un échantillon à géométrie coaxiale		64
Figure 6 – Schéma de propagation des ondes de pression sur la section d'un cylindre		65
Figure 7 – Organigramme de calcul du champ électrique dans un échantillon coaxial à partir des courants mesurés par la méthode PWP		67
Figure A.1 – Comparaison entre les impulsions de pression réelles et idéales		68
Figure A.2 – Signal d'origine de l'échantillon sans charges et sous une tension modérée		69
Figure A.3 – Comparaison entre les signaux de référence d'origine et corrigé avec un échantillon sans charges et sous une tension modérée.....		70
Figure A.4 – Champ électrique dans un échantillon sous tension et avec charges d'espace, calculé à partir des signaux d'origine et corrigé.....		71
Figure A.5 – Caractéristiques géométriques du signal de référence pour l'estimation des coefficients de correction		72
Figure A.6 – Signal de référence corrigé à l'aide d'un coefficient déterminé graphiquement et d'un coefficient ajusté		72
Figure A.7 – Champ électrique dans un échantillon sous tension appliquée et avec charges d'espace, calculé à l'aide d'un coefficient déterminé graphiquement et d'un coefficient ajusté.....		73
Figure B.1 – Signaux de tension mesurés par l'amplificateur avec différents gains et enregistrés par l'oscilloscope		76
Figure B.2 – Signaux de courant induits par l'échantillon, en fonction de l'impédance d'entrée et du gain de l'amplificateur.....		76

Figure B.3 – Relation entre le pic de courant mesuré aux bornes de la première électrode et la tension appliquée	77
Figure C.1 – Signal de courant mesuré sous une tension de –5,8 kV	79
Figure C.2 – Premier signal de courant mesuré (< 1 min).....	79
Figure C.3 – Signal de courant mesuré après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	80
Figure C.4 – Signal de courant mesuré sans tension appliquée, après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	80
Figure C.5 – Répartition du champ électrique interne sous une tension de –5,8 kV	81
Figure C.6 – Répartition du champ électrique interne sous une tension de –46,4 kV, à l'état initial	81
Figure C.7 – Répartition du champ électrique interne après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	82
Figure C.8 – Répartition du champ électrique interne sans tension appliquée, après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	82
Figure C.9 – Répartition des charges d'espace après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	83
Figure C.10 – Répartition des charges d'espace sans tension appliquée, après 1,5 h sous une tension de –46,4 kV	84
Figure D.1 – Courants mesurés sur l'échantillon coaxial en LDPE sous différentes tensions appliquées dans un délai de quelques minutes	86
Figure D.2 – Relation entre l'amplitude de crête du courant mesuré aux bornes des électrodes extérieure et intérieure et la tension appliquée.....	86
Figure D.3 – Premier signal de courant mesuré sur l'échantillon coaxial (< 1 min)	87
Figure D.4 – Signaux de courant mesurés sur l'échantillon coaxial au début et après 2 h sous une tension de –90,0 kV	88
Figure D.5 – Signaux de courant mesurés sur l'échantillon coaxial après 2 h sous une tension de –90,0 kV, et sans tension appliquée après 2 h sous une haute tension	88
Figure D.6 – Répartition du champ électrique interne sous une tension de –22,5 kV sur l'échantillon coaxial.....	89
Figure D.7 – Répartition du champ électrique interne sous une tension de –90,0 kV sur l'échantillon coaxial, à l'état initial	90
Figure D.8 – Répartition du champ électrique interne après 2 h sous une tension de –90,0 kV	90
Figure D.9 – Répartition du champ électrique interne sans tension appliquée, après 2 h sous une tension de –90,0 kV	91
Figure D.10 – Répartition des charges d'espace avec et sans tension appliquée, après 2 h sous une tension de –90,0 kV	92
Tableau A.1 – Variantes des symboles utilisés dans le texte.....	73
Tableau D.2 – Analyse du rapport entre l'aire des pics théorique et l'aire des pics mesurée pour le signal de courant mesuré.....	87

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURAGE DU CHAMP ÉLECTRIQUE INTERNE DANS
LES MATÉRIAUX ISOLANTS – MÉTHODE DE L'ONDE DE PRESSION****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 62836 a été établie par le comité d'études 112 de l'IEC: Évaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette première édition annule et remplace l'IEC TS 62836 parue en 2020.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'IEC TS 62836:

- a) ajout de l'Article 12 relatif au mesurage de la répartition des charges d'espace sur un échantillon plan;
- b) ajout de l'Article 13 relatif aux échantillons à géométrie coaxiale;

- c) ajout de l'Annexe D qui fournit des exemples de mesurages sur des échantillons à géométrie coaxiale;
- d) ajout d'une Bibliographie;
- e) les exemples de mesurages sur un échantillon plan ont été déplacés de l'Article 12 de l'IEC TS 62836 à l'Annexe C.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
112/627/FDIS	112/632/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'il contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer ce document en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Les structures isolantes soumises à des tensions élevées, notamment les condensateurs et les câbles à haute tension continue, etc., sont sujettes à une accumulation de charges, ce qui peut conduire à un claquage électrique si le champ électrique produit par ces charges dépasse le seuil de claquage électrique. Avec le développement des centrales électriques, en particulier les moyens de production d'énergie "propre" comme les centrales éoliennes ou solaires, le nombre de câbles utilisés pour raccorder ces centrales au réseau et partager l'énergie électrique entre les différents pays ne cesse d'augmenter. Par conséquent, afin de pouvoir caractériser le champ électrique interne généré, une procédure d'essai normalisée est devenue essentielle pour les matériaux destinés à la fabrication des câbles, voire la structure de ces câbles, au niveau des électrodes ou de la jonction entre les câbles. Le mesurage du champ électrique interne permet de comparer les matériaux et d'établir des seuils concernant le champ électrique interne admis dans les applications à haute tension afin d'éviter le plus possible les risques de claquage. De nombreux chercheurs utilisent la méthode de l'onde de pression (PWP, *Pressure Wave Propagation*) pour mesurer la répartition des charges d'espace et du champ électrique interne dans les isolants. Toutefois, comme ces chercheurs internationaux développent leurs propres équipements expérimentaux, avec de légères différences, il est difficile de comparer les mesures relevées par les différents équipements.

La procédure décrite dans le présent document fournit ainsi un point de comparaison fiable entre les différents résultats d'essais effectués par différents laboratoires afin d'éviter des erreurs d'interprétation. Cette méthode convient aux échantillons plans de type plaque ainsi qu'aux échantillons coaxiaux, constitués de matériaux isolants homogènes d'une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 5 mm.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62836:2024

MESURAGE DU CHAMP ÉLECTRIQUE INTERNE DANS LES MATÉRIAUX ISOLANTS – MÉTHODE DE L'ONDE DE PRESSION

1 Domaine d'application

Le présent document fournit une procédure efficace et fiable pour évaluer le champ électrique interne dans les matériaux isolants utilisés pour les applications à haute tension, par la méthode de l'onde de pression (PWP). Cette méthode convient aux échantillons à géométrie plane et coaxiale constitués de matériaux isolants homogènes d'une épaisseur supérieure ou égale à 0,5 mm et aux champs électriques supérieurs à 1 kV/mm, mais elle dépend également de l'épaisseur de l'échantillon et du générateur d'ondes de pression.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1.1

méthode de l'onde de pression

procédure par laquelle une onde de pression est propagée dans un matériau contenant des charges électriques et le signal électrique généré au niveau des électrodes est alors mesuré

3.1.2

charge d'interface

couche de charges électriques qui se produisent entre deux matériaux différents, soit entre deux isolants différents soit entre un conducteur et un isolant

3.1.3

charge d'espace

charge électrique qui se produit à l'intérieur d'un matériau isolant diélectrique

3.2 Abréviations

CB (Carbon Black)	noir de carbone
EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)	acétate d'éthyle vinylique
LDPE (Low Density Polyethylene)	polyéthylène à basse densité
LIPP (Laser Induced Pressure Pulse)	onde de pression induite par une impulsion laser
PE	polyéthylène
PIPP (Piezoelectrically Induced Pressure Pulse)	onde de pression induite par un dispositif piézoélectrique

PMMA	polyméthacrylate de méthyle
PWP (Pressure Wave Propagation)	propagation des ondes de pression/méthode de l'onde de pression
S/N (Signal to Noise Ratio)	rapport signal/bruit

4 Principe de la méthode

La Figure 1 représente le schéma de principe de la méthode PWP sur un échantillon plan. La Figure 1 a) représente le schéma de principe et la relation entre le courant mesuré par la méthode PWP et la répartition du champ électrique dans l'échantillon sans charges d'espace. La Figure 1 b) représente le schéma de principe et la relation entre le courant mesuré par la méthode PWP et la répartition des charges d'espace dans l'échantillon sans tension appliquée. La Figure 1 c) représente le schéma de mesure par la méthode PWP. Sur la Figure 1, x_f est la position du front de l'impulsion, d_0 est l'épaisseur d'origine de l'échantillon et $d_0 \approx d$ dans le cas d'une impulsion étroite.

Avec cette méthode, le principe consiste à appliquer une onde de pression pour provoquer un déplacement des charges d'espace à l'intérieur du diélectrique et au niveau des interfaces. Le déplacement de ces charges induit alors un signal électrique dans le circuit, qui permet de caractériser la répartition des charges par mesurage du courant résultant lorsque l'échantillon est en condition de court-circuit. L'expression pour le signal de courant de court-circuit en fonction du temps t s'écrit

$$i(t) = C_0 \int_0^d BE(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (1)$$

où

$E(x)$ est l'amplitude du champ électrique dans l'échantillon à la position x ;

d est l'épaisseur de l'échantillon;

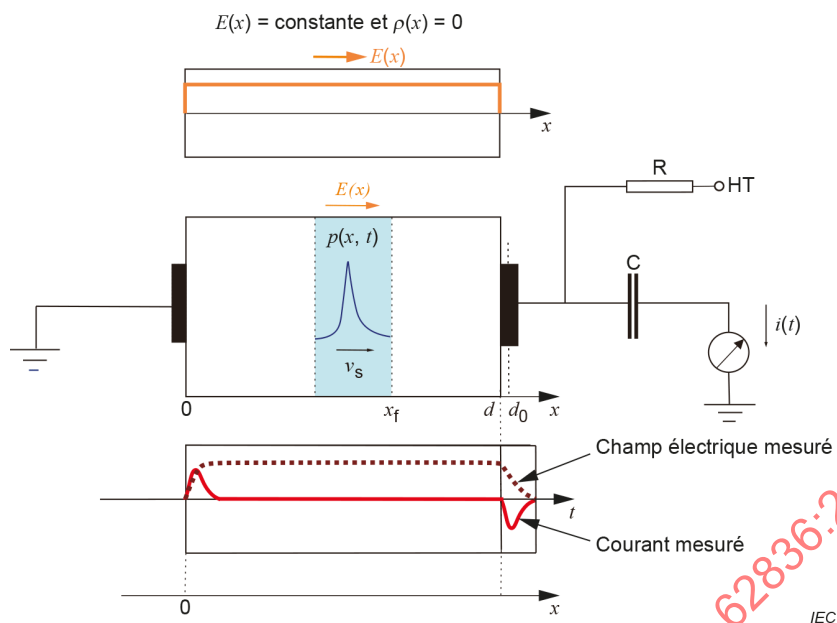
$p(x, t)$ est l'onde de pression dans l'échantillon, qui dépend des matériaux d'électrodes, du matériau de l'échantillon diélectrique, du mode de couplage à l'interface, etc.;

C_0 est la capacité de l'échantillon sous l'action d'une onde de pression. La zone active est la zone sur laquelle l'onde de pression agit; elle doit être plus petite que la zone de l'électrode de mesure.

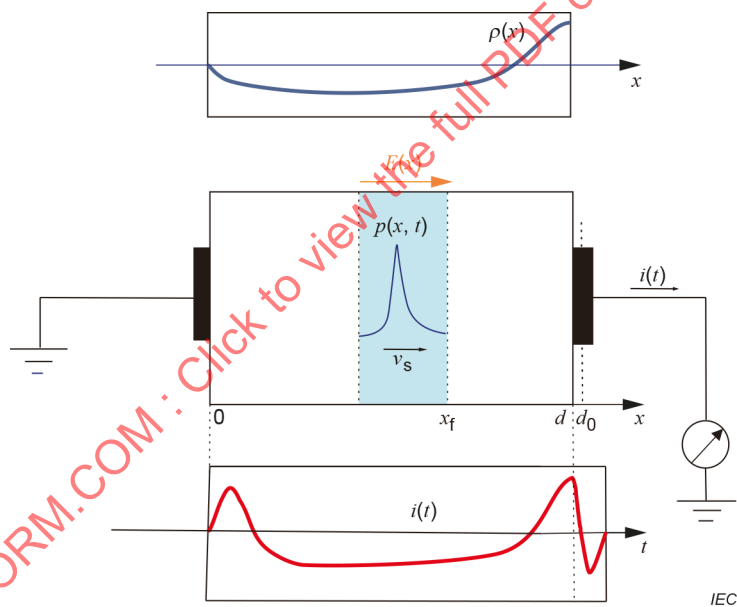
C_0 dépend de l'épaisseur de l'échantillon et de sa surface qui est égale à la zone d'action de l'onde de pression.

La constante $B = \chi(1 - a/\epsilon)$ dépend uniquement des caractéristiques des matériaux diélectriques. Dans cette formule, χ est le coefficient de compressibilité du matériau, ϵ est la permittivité du matériau et a est le coefficient électrostrictif du matériau. Pour les matériaux diélectriques hétérogènes, la constante B est une fonction de la position. Pour les matériaux diélectriques homogènes, la constante B est placée en dehors de l'intégrale, car elle ne dépend pas de la position. Néanmoins, B dépend des conditions de mesure. Le mesurage est effectué dans des conditions d'environnement données, ainsi B doit être déterminée pendant l'étalonnage sous les mêmes conditions (température, humidité et pression). Dans le présent document, seuls des matériaux diélectriques homogènes sont pris en compte; B est donc une constante.

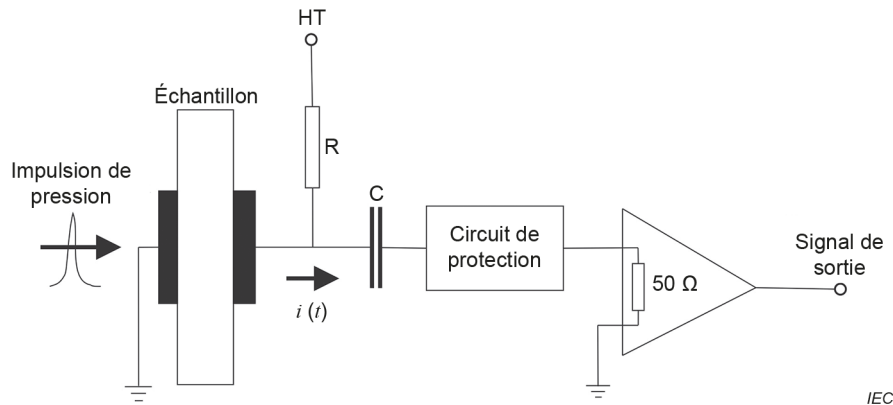
Dans l'Équation (1), la répartition du champ électrique peut être déterminée par déconvolution.



a) Application d'une impulsion de pression et mesurage du courant de court-circuit sous tension appliquée, mais sans charges d'espace



b) Application d'une impulsion de pression et mesurage du courant de court-circuit avec charges d'espace, mais sans tension appliquée



c) Schéma de mesure

Légende x_f position du front de l'impulsion d_0 épaisseur d'origine de l'échantillon $d_0 \approx d$ dans le cas d'une impulsion étroite**Figure 1 – Schéma de principe de la méthode PWP**

L'onde de pression appliquée peut être générée par différentes techniques, mais le même type d'analyse peut être effectué, quelle que soit la technique retenue. La méthode PWP couramment utilisée peut être mise en œuvre selon deux techniques: soit une onde de pression est induite par une impulsion laser puissante (technique LIPP), soit une onde de pression est induite par un dispositif piézoélectrique (selon la technique appelée PIPP). La sensibilité et la résolution de la méthode PWP dépendent principalement de l'amplitude et de la durée de l'impulsion de pression. La méthode LIPP présente l'avantage d'effectuer des mesurages très sensibles sans contact. La méthode PIPP présente l'avantage d'obtenir la mesure avec un débit de mesure élevé et de fournir un système de mesure peu coûteux.

Dans le cas d'une impulsion étroite, par exemple lorsque la durée de l'impulsion de pression est sensiblement inférieure au temps de transit de l'onde de pression dans l'échantillon, τ est la durée de l'impulsion de pression avec $\tau \ll [\min(d_0, d_x)] / v_s$,

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^t i(t') dt' = C_0 B \overline{E(x)} \int_0^d p(x, t) dx \\ x = v_s t \end{array} \right. \quad (2)$$

où

 v_s est la vitesse du son dans l'échantillon;

$\overline{E(x)}, x = v_s t$ est le champ électrique moyen pendant la largeur de l'impulsion de pression à la position x . Pour simplifier, l'expression $\overline{E(x = v_s t)}$ est utilisée dans le présent document.

En raison des pertes acoustiques et de la dispersion acoustique dans les diélectriques de type polymères, l'amplitude de $p(x,t)$ diminue et la largeur de $p(x,t)$ augmente pendant la propagation d'une impulsion de pression dans l'échantillon. Pour les diélectriques de type polymères, la dispersion acoustique est dominante. Même si $p(x,t)$ n'est pas une constante dans les diélectriques, son intégrale $\int_0^d p(x,t) dx$ demeure constante pendant la propagation d'une impulsion de pression dans l'échantillon.

À partir de l'Équation (2), si le signal est obtenu avec un échantillon sans charges et soumis à une tension intermédiaire U_0 , il est possible de déterminer $B \int_0^d p(x,t) dx$, car le champ électrique $\overline{E(x=v_s t)} = E_0$ est uniforme dans ce cas et la capacité C_0 de l'échantillon est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'échantillon. Cette formule peut être utilisée comme référence d'étalonnage pour les autres mesurages.

5 Échantillons

Pour les échantillons, il est suggéré d'utiliser un matériau isolant diélectrique, par exemple un échantillon plan de type plaque en polyéthylène d'une épaisseur de 1 mm ou 2 mm et d'un diamètre suffisant pour éviter des décharges aux bords des électrodes, généralement supérieur à 200 mm, équipé d'électrodes centrées en forme de disque d'un diamètre de 50 mm pour une tension de 60 kV.

6 Matériaux d'électrodes

Le choix des matériaux d'électrodes dépend de la méthode de génération de l'impulsion de pression. Généralement, des électrodes semiconductrices en acétate d'éthyle vinylique/noir de carbone (EVA+CB) ou en polyéthylène/noir de carbone (PE+CB) sont utilisées. Pour la méthode PWP par impulsion laser (également appelée LIPP), l'épaisseur appropriée pour l'électrode semiconductrice est d'environ 0,5 mm, mais doit être inférieure à 1 mm. Si l'électrode et l'isolant ont des impédances acoustiques différentes, il convient que le temps de transit de l'onde de pression dans l'électrode soit au moins égal à la moitié de celui de l'isolant afin d'éviter des échos parasites.

Il est important de maintenir un bon contact entre l'électrode et l'isolant. Il est recommandé d'utiliser un collage par pressage à chaud pour souder l'électrode sur l'échantillon.

NOTE Le collage par pressage à chaud constitue un moyen efficace et simple pour fixer l'électrode ou les électrodes semiconductrices et l'échantillon en PE, et ainsi obtenir de bons contacts de surface entre les éléments. Cela implique l'application d'une pression uniaxiale à une température donnée et sur une période donnée, qui dépendent des matériaux de l'échantillon et des électrodes.

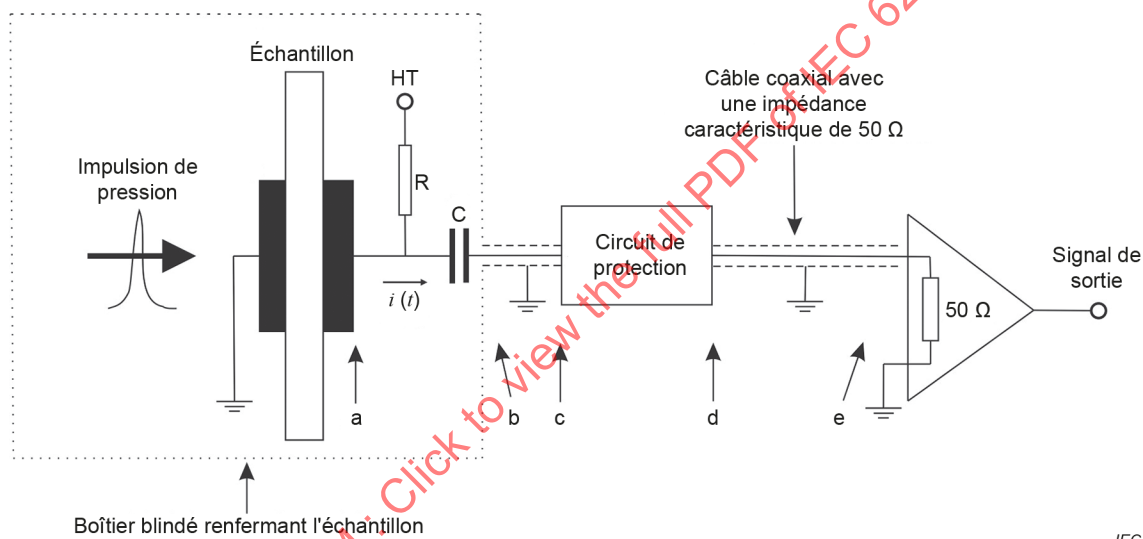
7 Génération de l'impulsion de pression

Il convient que l'impulsion de pression suggérée ait une durée comprise entre 20 ns et 50 ns et une amplitude comprise entre 1 MPa et 10 MPa pour un échantillon d'une épaisseur de 0,5 mm à 5 mm. Elle peut être générée par un dispositif à impulsions piézoélectriques ou par un laser pulsé puissant. Si un laser puissant est utilisé, l'énergie suggérée est comprise entre 300 mJ et 500 mJ environ pour une durée d'impulsion de 3 ns à 7 ns.

NOTE L'amplitude de la pression, la durée d'application et l'énergie du laser peuvent être réglées en fonction du matériau en essai.

8 Montage de mesure

Le montage de mesure est représenté sur la Figure 2. Dans le montage, la longueur l_{ab} (longueur de la connexion entre l'échantillon et le connecteur de sortie, c'est-à-dire entre a et b) doit être inférieure à 0,5 m. Il convient que la longueur l_{bc} du câble de connexion avec l'impédance caractéristique de $50\ \Omega$ entre le circuit de sortie et le circuit de protection (entre b et c) soit inférieure à 0,5 m. En outre, il convient que la longueur l_{de} du câble de connexion avec l'impédance caractéristique de $50\ \Omega$ entre le circuit de protection et l'amplificateur (entre d et e) soit inférieure à 0,5 m. Il convient que la longueur totale de $l_{bc} + l_{de}$ (entre b et e) soit également inférieure à 0,5 m. C'est la principale suggestion pour éviter tout effet de réflexion du signal mesuré entre l'amplificateur et l'échantillon, lorsque l'impédance d'entrée de l'amplificateur ne coïncide pas parfaitement avec celle du câble de signal. Un amplificateur avec un gain de 40 dB et une bande passante de 200 MHz est approprié. Il convient que l'impédance d'entrée de l'amplificateur soit strictement égale à $50\ \Omega$ afin d'éviter tout signal de réflexion indésirable. La valeur de la résistance R sur la Figure 2 dépend des conditions de la tension appliquée, mais doit être comprise dans la plage de $100\ \text{M}\Omega$ à $1\ \text{G}\Omega$ pour limiter le courant lorsque l'échantillon se décharge.



Légende

a, b, c, d et e représentent les positions réelles dans le système de mesure.

Figure 2 – Montage de mesure pour la méthode PWP

Le circuit de protection est représenté sur la Figure 3. Il convient que le temps de commutation des diodes du circuit de protection soit court pour éliminer tout phénomène de surtensions rapides. Il est recommandé d'utiliser une résistance de $5\ \Omega$ sans induction résiduelle dans le circuit de protection.

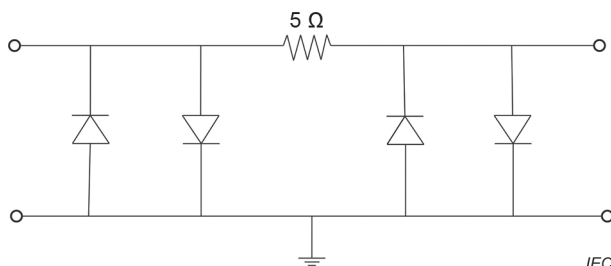


Figure 3 – Échantillon de circuit visant à protéger l'amplificateur contre les dommages dus à une faible décharge sur l'échantillon

9 Étalonnage du champ électrique

Pour un échantillon plan de type plaque d'une épaisseur comprise entre 1 mm et 2 mm, le champ appliqué pour l'étalonnage est d'environ 5 kV/mm à 10 kV/mm sur une courte période (généralement inférieure à 1 min) afin d'éviter l'injection et l'accumulation de charges d'espace. Si des charges d'espace sont déjà présentes dans l'échantillon avant le mesurage d'étalonnage, il est possible d'effectuer le mesurage d'étalonnage à partir d'une mesure sous tension et de soustraire le signal mesuré en conditions de court-circuit immédiatement avant ou après le mesurage sous tension.

10 Procédure de mesure

Pour reproduire les mêmes matériaux isolants diélectriques, les mêmes matériaux d'électrodes et la même condition d'interface entre l'électrode et l'isolant, un échantillon d'épaisseur d_0 est utilisé comme échantillon d'étalonnage et un autre échantillon d'épaisseur d_x est utilisé comme échantillon d'essai.

Pour l'échantillon d'étalonnage d'épaisseur d_0 , une tension U_0 est appliquée sur une courte période et de manière suffisamment rapide afin d'éviter l'accumulation de charges dans l'échantillon. Voir aussi l'Annexe C. Le champ électrique interne dans l'échantillon est $E_0 = -U_0/d_0$ en l'absence de charges d'espace. Sous l'action de l'impulsion de pression, le signal de courant de court-circuit mesuré est égal à

$$i_c(t) = C_0 B \int_0^{d_0} E_0 \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (3)$$

En appliquant une fonction d'intégration dans le temps sur ce signal de courant, on obtient

$$\int_0^t i_c(t') dt' = C_0 B E_0 \int_0^{d_0} p(x, t) dx \quad (4)$$

où $\bar{E} = E_0$, car le champ électrique est uniforme.

Pour l'échantillon d'essai d'épaisseur d_x , le signal de court-circuit mesuré est

$$i_m(t) = C_0 B \int_0^{d_x} E(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx \quad (5)$$

Désormais, le champ électrique interne dépend de la tension appliquée et des charges d'espace présentes. Ce champ n'est donc plus uniforme; il varie en fonction de sa position dans l'espace. Après l'intégration dans le temps, on obtient

$$\int_0^t i_m(t') dt' = C_x \overline{BE(x = v_s t)} \int_0^{d_x} p(x, t) dx \quad (6)$$

11 Traitement des données pour les mesurages expérimentaux

L'intégrale de l'impulsion de pression est la même pour l'échantillon d'essai et pour l'échantillon d'étalonnage, c'est-à-dire.

$$\int_0^{d_0} p(x, t) dx = \int_0^{d_x} p(x, t) dx \quad (7)$$

Si la zone active de l'impulsion de pression est S_0 , alors

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_0}, C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_x}, E_0 = \frac{U_0}{d_0} \quad (8)$$

On obtient donc

$$\frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_x} \overline{BE(x = v_s t)} \int_0^{d_x} p(x, t) dx}{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_0}{d_0} B \frac{U_0}{d_0} \int_0^{d_0} p(x, t) dx} = \frac{-d_0 \overline{E(x = v_s t)} d_0}{d_x U_0} \quad (9)$$

L'expression suivante peut alors être obtenue

$$\overline{E(x = v_s t)} = \frac{-\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} \times \frac{d_x U_0}{d_0^2} \quad (10)$$

Si l'épaisseur et la zone d'essai sont identiques pour l'échantillon d'essai et l'échantillon d'étalonnage, ou si l'échantillon d'essai est également utilisé comme échantillon d'étalonnage ($d_0 = d_x$)

$$\overline{E(x = v_s t)} = -\frac{U_0}{d_0} \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} = E_0 \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^t i_c(t') dt'} \quad (11)$$

Par conséquent, le champ électrique interne peut être déterminé à l'aide de l'Équation (11) ci-dessus. Cette méthode convient aux échantillons sous tension et aux échantillons en court-circuit qui comportent des charges d'espace.

Il peut être noté qu'il convient que le dénominateur de cette expression soit une constante, car le champ électrique est uniforme dans le cadre du mesurage d'étalonnage. Afin d'améliorer le rapport signal/bruit, le dénominateur peut être remplacé de manière fiable par l'amplitude de l'intégrale calculée, ou par l'intégrale du premier pic, comme suit

$$\overline{E(x = v_s t)} = -\frac{U_0}{d_0} \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} = E_0 \times \frac{\int_0^t i_m(t') dt'}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} \quad (12)$$

Dans l'Équation (12), τ est la durée de l'impulsion de pression dans l'échantillon, le dénominateur de l'équation n'est plus une fonction du temps, mais de l'intégrale définie du premier pic de courant mesuré. La limite supérieure de l'intégrale est fixée à 5τ pour s'assurer que le premier pic de courant est complètement inclus. La limite supérieure peut être ajustée en fonction des conditions.

12 Mesurage de la répartition des charges d'espace

Avec l'Équation (12), la vitesse de l'onde de pression $x = v_s t$ et l'équation de Poisson pour une dimension $\rho(x) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial x}$, la répartition des charges d'espace peut être déterminée comme suit:

$$\rho_m(x = v_s t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{v_s} \cdot \frac{E_0}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} \cdot i_m(t) = \gamma \cdot i_m(t) \quad (13)$$

où $\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{v_s} \cdot \frac{E_0}{\int_0^{5\tau} i_c(t') dt'} = \gamma$ est une constante qui dépend uniquement des propriétés de

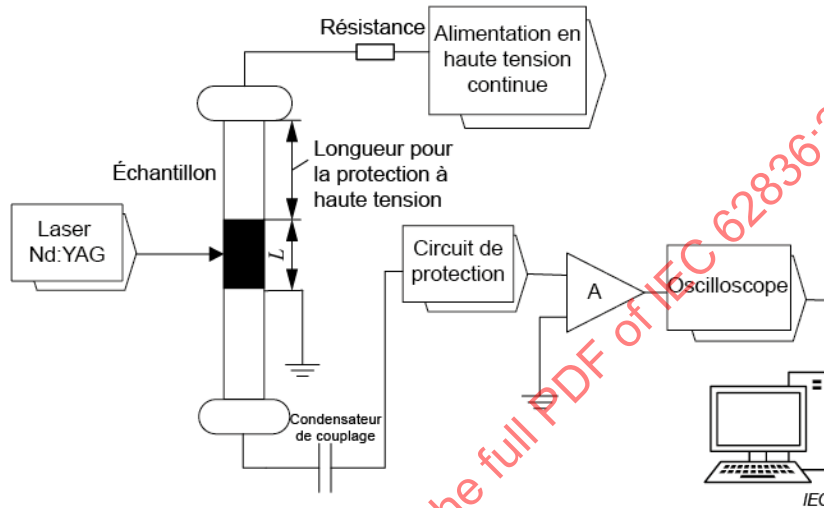
l'échantillon. L'Équation (13) convient à toute tension de mesure appliquée, et γ peut être déterminée par le signal de courant mesuré sous la tension appliquée plus basse. Voir aussi l'Article 9.

13 Influence de la géométrie coaxiale

13.1 Montage de mesure pour la méthode de l'onde de pression dans le cas d'un échantillon à géométrie coaxiale

Pour les échantillons à géométrie coaxiale comme les câbles, etc., le mesurage n'est pas exactement la même que celui des échantillons plans de type plaque.

La Figure 4 représente le schéma du montage de mesure pour la méthode de l'onde de pression dans le cas d'un échantillon coaxial, comme un câble court. Si l'échantillon est découpé dans un câble long réel, sa couche semiconductrice aux deux extrémités doit être retirée afin d'éviter tout phénomène de claquage par contournement. La longueur à retirer dépend de la tension appliquée pendant l'essai. La couche semiconductrice est conservée dans la partie médiane du câble afin de maintenir un champ électrique bien défini à la position de mesure. La longueur L doit être 10 fois plus grande que le diamètre de la zone active et 10 fois plus grande que l'épaisseur d'isolant. Une source d'alimentation à haute tension continue est connectée à une extrémité du conducteur du câble par l'intermédiaire d'une résistance à haute tension. L'onde de pression peut être générée par un laser pulsé puissant ou un générateur piézoélectrique d'ondes de pression, identique à celui décrit à l'Article 7.



Légende

La partie noire de l'échantillon représente la couche d'électrode semiconductrice extérieure.

Figure 4 – Schéma du montage de mesure pour la méthode de l'onde de pression dans le cas d'un échantillon coaxial

Le signal parcourt un condensateur de couplage, le circuit de protection, puis est mesuré par l'amplificateur et enregistré par un oscilloscope numérique pour un traitement informatisé des données le cas échéant.

13.2 Modèle physique à géométrie coaxiale

Dans le modèle physique représenté sur la Figure 5, les rayons intérieur et extérieur du diélectrique d'un échantillon coaxial sont respectivement r_i et r_o . En considérant une dimension dans une structure cylindrique, les ondes de pression sont présumées se propager le long du rayon dans cet échantillon. L'équation de Poisson s'écrit alors

$$\operatorname{div}[\varepsilon E(r)] = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial [r \cdot \varepsilon \cdot E(r)]}{\partial r} = \rho(r) \quad (14)$$

où $E(r)$ est le champ électrique le long du rayon, ε est la constante diélectrique et $\rho(r)$ est la répartition de la densité volumique des charges d'espace.

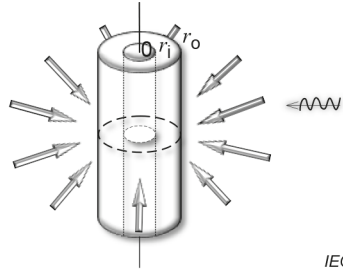


Figure 5 – Schéma de propagation des ondes selon la méthode PWP dans le cas d'un échantillon à géométrie coaxiale

À partir du modèle physique, l'expression du signal en conditions de court-circuit dans le cas de matériaux uniformes à géométrie coaxiale peut être donnée comme suit:

$$i_m(t) = -C_0 \left\{ (1+A) \chi \int \left[E(r) \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} \right] dr + 2 \int \frac{E(r)}{r} \cdot \frac{\partial \eta(r,t)}{\partial t} dr \right\} \quad (15)$$

Elle est équivalente à l'Équation (1) pour l'échantillon plan de type plaque. Ici, C_0 est la capacité de l'échantillon sous l'action d'une onde de pression, $\eta(r,t)$ est le déplacement du matériau, la constante A est liée à la pression $p(r,t)$ et la constante diélectrique ε . Néanmoins, l'Équation (15) ne reflète pas directement la relation entre les charges d'espace et le courant mesuré, car elle dépend à la fois de l'onde de pression $p(r,t)$ et du déplacement du matériau $\eta(r,t)$. Lorsque le rayon intérieur r_i de l'échantillon coaxial n'est pas très faible, c'est-à-dire 10 fois supérieur à la largeur de l'impulsion de pression, le courant mesuré peut être décrit par l'expression suivante:

$$i_m(t) = -C_0 \chi \left\{ (1+A) \int \left[E(r) \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} \right] dr - 2v \int \frac{E(r)}{r} \cdot p(r,t) dr \right\} \quad (16)$$

où v est la vitesse du son dans l'échantillon. Lorsque la forme de la pression $p(r,t)$ est une impulsion étroite d'amplitude P_0 et de durée τ , et compte tenu de la dispersion négligeable lorsque l'onde de pression se propage de l'extérieur à l'intérieur, l'expression du courant peut être simplifiée par l'équation suivante:

$$i_m(t) = \frac{v^2 \tau}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} P_0 C_0 \chi \sqrt{\frac{r_A}{r}} \left[(1+A) \rho(r) + \left(\frac{1}{2} - \frac{3A}{2} \right) \frac{E(r)}{r} \varepsilon_0 \varepsilon_r \right] \quad (17)$$

où $r = vt$.

En l'absence de charges d'espace, le rapport entre les pics de courant aux deux interfaces de l'électrode est déterminé comme suit:

$$\frac{i_m(t)|_{r=r_o}}{i_m(t)|_{r=r_i}} = \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

où r_i et r_o sont respectivement les rayons de l'électrode intérieure et de l'électrode extérieure. Le pic de courant au niveau de l'électrode intérieure est supérieur à celui au niveau de l'électrode extérieure. En outre, plus la partie isolante du câble est mince pour un même diamètre extérieur, plus ce rapport s'approche de 1.

13.3 Conditions de mesure

Même si le rayon intérieur du câble n'est pas considéré comme faible, étant donné que le rayon intérieur est au moins égal à 10 fois la largeur de l'impulsion de pression, un effet limité de la dispersion spatiale due à la géométrie du câble peut également être observé, comme cela est représenté sur la Figure 6. Par conséquent, les ondes de pression ne se concentrent pas sur le point O, mais s'écartent de celui-ci. Par conséquent, le rapport peut être inférieur à celui attendu. Toutefois, cet effet est relativement négligeable dans la géométrie étudiée, car l'épaisseur de l'échantillon est sensiblement inférieure à la distance de Rayleigh, ce qui explique pourquoi les résultats expérimentaux sont proches des résultats théoriques.

NOTE Pour les ondes acoustiques ou élastiques émises par un réseau planaire excité de manière uniforme qui transmet un signal sinusoïdal, la distance de Rayleigh (également appelée longueur de Rayleigh) est la distance par rapport au réseau qui sépare une région en champ proche, dans laquelle l'énergie rayonnée est limitée à une région cylindrique, et une région en champ éloigné, dans laquelle le champ d'ondes présente un étalement sphérique et l'amplitude du champ varie inversement par rapport à la plage.

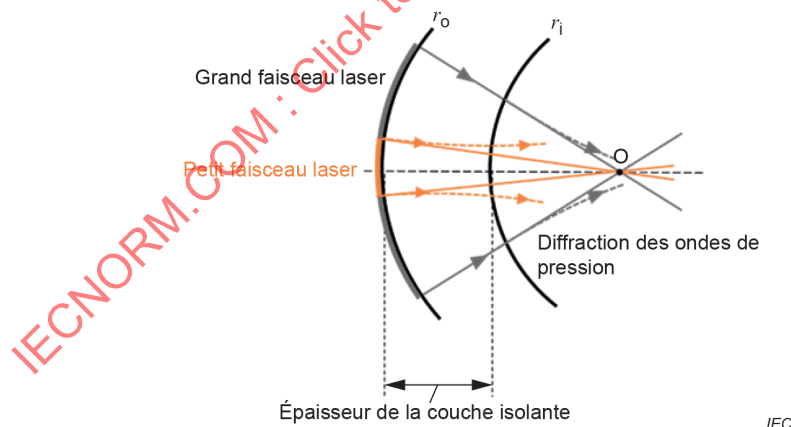


Figure 6 – Schéma de propagation des ondes de pression sur la section d'un cylindre

L'Équation (16) et l'Équation (17) comportent deux termes. Le premier terme est lié aux charges d'espace, et le second est lié au champ électrique. Toutefois, le second terme est relativement faible dans la géométrie étudiée si le rayon de l'électrode extérieure est inférieur à trois fois celui de l'électrode intérieure.

Par conséquent, les trois conditions suivantes sont nécessaires pour les mesurages afin d'obtenir des résultats fiables:

- 1) le rayon intérieur de l'échantillon coaxial est 10 fois supérieur à la largeur de l'impulsion de pression;
- 2) sous l'action d'une onde de pression, le diamètre (ou la longueur latérale) de la surface est supérieur à l'épaisseur d'isolant de l'échantillon coaxial;
- 3) le rapport entre les rayons extérieur et intérieur est inférieur à 3.

13.4 Étalonage du champ électrique dans le cas d'un échantillon coaxial

13.4.1 Récapitulatif

Pour un échantillon coaxial avec une épaisseur d'isolant comprise entre 1 mm et 20 mm, le champ moyen appliqué pour l'étalonnage est d'environ 3 kV/mm à 5 kV/mm sur une courte période (généralement inférieure à 1 min) afin d'éviter l'injection et l'accumulation de charges d'espace.

13.4.2 Vérification de la linéarité

La linéarité du système de mesure d'un échantillon coaxial peut être vérifiée à tout moment et à n'importe quelle température, si nécessaire, ou à une fréquence donnée, par exemple au minimum une fois par an. La limite de linéarité minimale suggérée par le coefficient de corrélation linéaire pour la méthode PWP dans le cas d'un échantillon à géométrie coaxiale est de 0,980. Si la linéarité du système de mesure est inférieure à la limite, il est nécessaire de vérifier le système de mesure et l'échantillon.

13.4.3 Vérification de la validité du rapport entre deux pics de courant

En l'absence de charges d'espace, il convient que le rapport entre deux pics de courant aux bornes des électrodes soit conforme à l'Équation (18). Si l'écart est supérieur à 10 %, il est nécessaire de vérifier si les conditions du 13.3 sont remplies.

13.4.4 Méthode de déduction du champ électrique interne à partir du signal de courant mesuré

Il n'est pas facile de déterminer directement la répartition du champ électrique interne à partir du signal de courant mesuré brut par l'Équation (16) ou l'Équation (17). La Figure 7 représente l'organigramme de calcul du champ électrique, qui est déterminé à partir du courant mesuré dans le champ appliqué sous la tension inférieure pour l'étalonnage et du courant mesuré dans le champ appliqué sous la tension supérieure pour l'essai.

Les exemples de mesurages sur des échantillons à géométrie coaxiale peuvent être consultés à l'Annexe D.

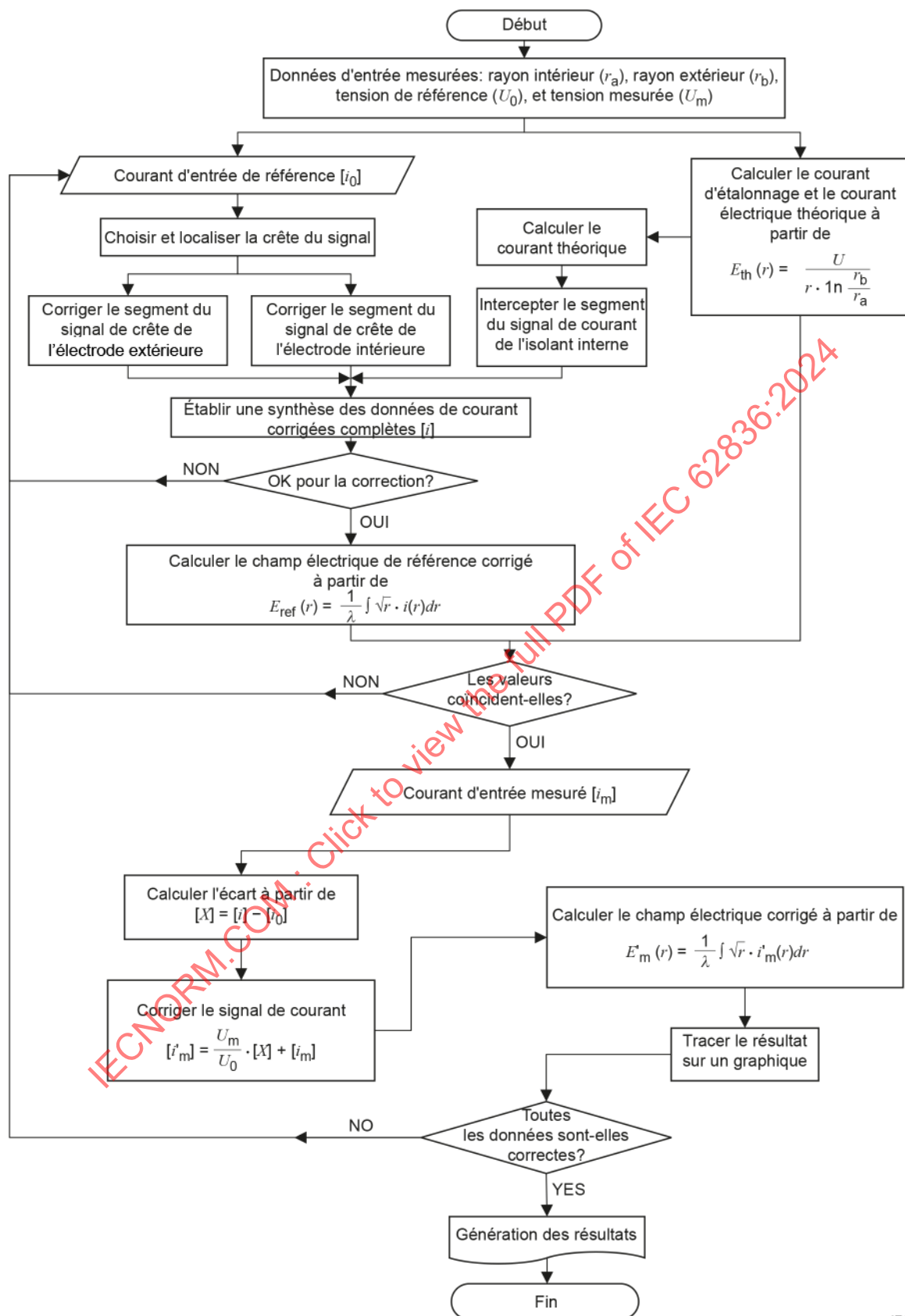


Figure 7 – Organigramme de calcul du champ électrique dans un échantillon coaxial à partir des courants mesurés par la méthode PWP

Annexe A (informative)

Méthode de préconditionnement du signal d'origine pour la méthode PWP sur un échantillon plan

A.1 Limite d'intégration simple

Il est admis que les procédures d'intégration sont sujettes à la présence de décalages par rapport au signal d'origine. En effet, l'intégration d'un décalage introduit une dérive qui peut fausser l'interprétation. À cette fin, le décalage de tout signal mesuré doit être éliminé avant d'appliquer une fonction d'intégration. Dans le cas de la méthode PWP par impulsion laser, en raison de la relaxation du matériau cible, certaines cibles utilisées pour convertir l'impulsion laser en impulsion de pression présentent un phénomène de résilience qui se traduit par une amplitude de pression non nulle après l'impulsion, comme cela est représenté sur la Figure A.1. C'est le cas des cibles en EVA chargées en carbone, comme cela est représenté sur la Figure A.2.

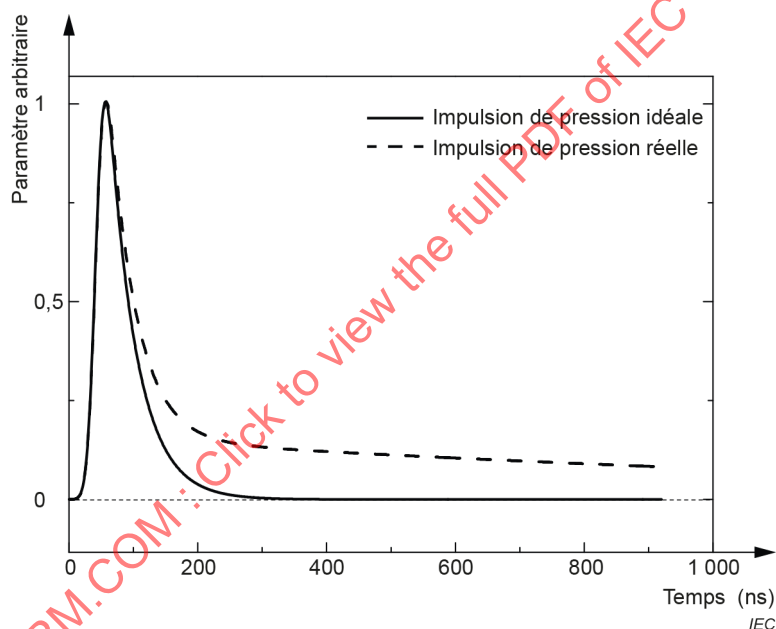


Figure A.1 – Comparaison entre les impulsions de pression réelles et idéales

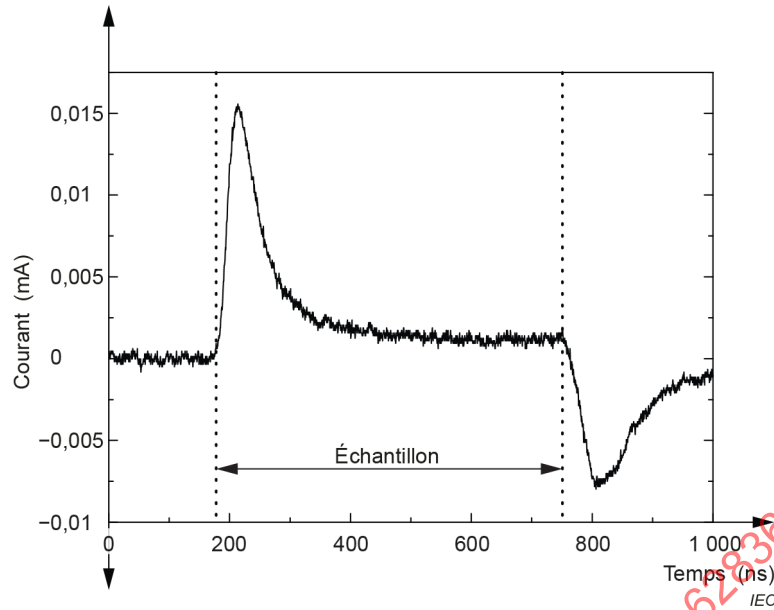


Figure A.2 – Signal d'origine de l'échantillon sans charges et sous une tension modérée

Même si l'effet de résilience est partiellement corrigé par la procédure décrite dans le présent document, une procédure d'intégration améliorée peut être utilisée afin d'obtenir de meilleures estimations du champ électrique. Cette procédure d'intégration améliorée inclut une correction de l'impulsion de pression générée par le laser afin d'éliminer l'effet de résilience.

A.2 Analyse de l'effet de résilience et procédure de correction de la résilience

Si la réponse de la cible était parfaite, l'impulsion de pression générée par le laser constituerait alors une impulsion idéale $p(t)$. En considérant des systèmes linéaires, on peut dire que la réponse impulsionnelle de la cible correspondrait à une distribution de Dirac: $\delta(t)$. En raison de la résilience, la réponse de la cible suit un processus lent dicté par une loi exponentielle. Par conséquent, en plus de l'impulsion idéale $p(t)$, on obtient un décalage qui décroît lentement. En considérant des systèmes linéaires, on peut dire que la réponse impulsionnelle réelle de la cible correspond à la somme d'une distribution de Dirac et d'une fonction exponentielle $\delta(t) + Ae^{-at}H(t)$, où A est l'amplitude de l'effet de résilience, $1/a$ est sa constante de temps et $H(t)$ est la fonction de Heaviside. Dans l'espace de Laplace, la fonction de transfert de la cible est

$$F(s) = 1 + \frac{A}{s+a} = \frac{s+a+A}{s+a} \quad (\text{A.1})$$

La correction de l'effet de résilience consiste à compenser la dépendance vis-à-vis de s de la fonction de transfert de la cible. Pour ce faire, il est possible de multiplier la fonction de transfert de la cible par $1/F(s) = (s+a)/(s+a+A)$. Sa transformation inverse de Laplace est

$$L^{-1}\left[\frac{1}{F(s)}\right] = \delta(t) - Ae^{-(a+A)t}H(t) \quad (\text{A.2})$$

où L^{-1} représente une opération de transformation inverse de Laplace.

La résilience peut alors être corrigée par la convolution du signal mesuré à l'aide de la Formule (A.2). Comme l'intégration correspond à une division par s dans l'espace de Laplace, la correction et l'intégration peuvent être effectuées simultanément. La transformation inverse de Laplace de $(s+a)/(s+a+A)/s$ est

$$h(t) = \left(1 - \frac{A}{a+A} \left(1 - e^{-(a+A)t} \right) \right) H(t) \quad (\text{A.3})$$

Par conséquent, la correction de la résilience et l'intégration du signal mesuré peuvent être effectuées simultanément par la convolution du signal mesuré à l'aide de la fonction $h(t)$. Il peut être noté que le premier 1 entre parenthèses correspond à l'intégration simple. L'autre terme, à l'exception du premier 1 entre parenthèses, correspond à la correction de la résilience.

A.3 Exemple de procédure de correction sur un échantillon en PE

Le signal de référence d'origine est mesuré sous un champ électrique modéré: 5 kV/mm. Le pic de courant du signal d'origine comportant du bruit présente de la résilience, comme cela est représenté sur la Figure A.2. La Figure A.3 représente la comparaison entre le signal de référence d'origine et le signal de référence corrigé par la Formule (A.2). Le signal corrigé a été déterminé avec les coefficients $1/A = 537$ ns et $1/a = 1\,452$ ns.

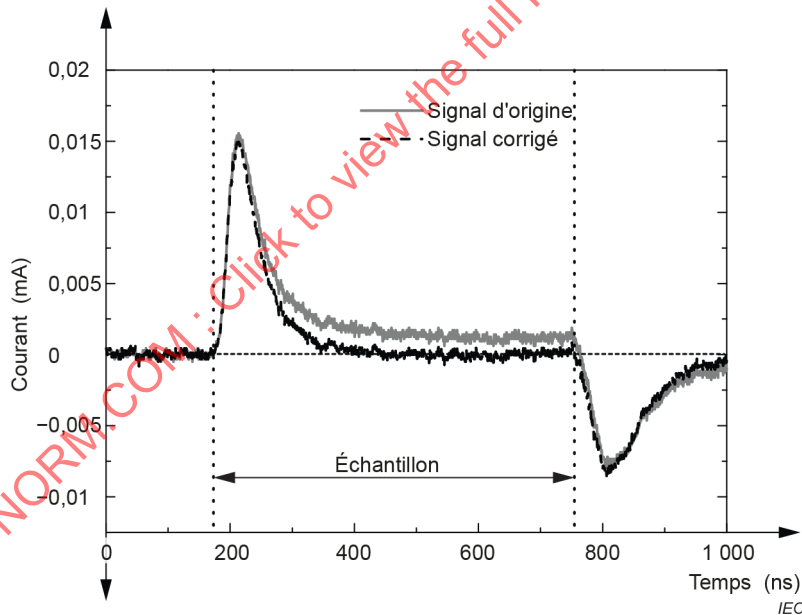


Figure A.3 – Comparaison entre les signaux de référence d'origine et corrigé avec un échantillon sans charges et sous une tension modérée

Le signal de l'échantillon sous l'action des charges d'espace peut être corrigé et intégré en même temps que $h(t)$, en appliquant les mêmes coefficients que le signal de référence. L'application de la méthode d'étalonnage décrite dans le présent document donne les résultats représentés sur la Figure A.4 pour l'intégration simple et l'intégration corrigée.

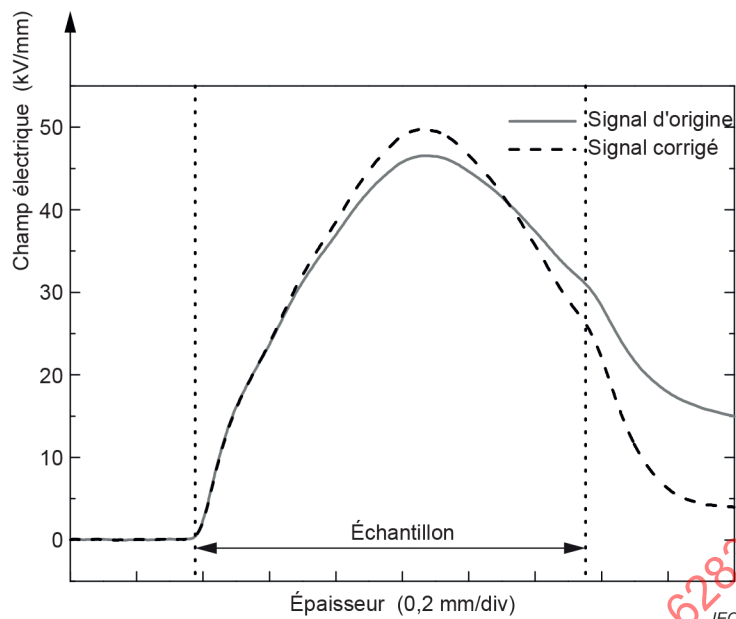


Figure A.4 – Champ électrique dans un échantillon sous tension et avec charges d'espace, calculé à partir des signaux d'origine et corrigé

Même si la résilience implique une dérive avec la procédure d'intégration simple, la dérive est partiellement compensée dans l'échantillon par l'étalonnage (voir l'Article C.3) décrit dans le présent document. Toutefois, la procédure d'intégration corrigée donne des résultats plus exacts.

A.4 Estimation des coefficients de correction

Les coefficients a et A dans les Formules (A.1), (A.2) et (A.3) peuvent être calculés à partir des caractéristiques géométriques du signal de référence (voir la Figure A.5). Si A_m et t_m sont respectivement l'amplitude et la valeur maximale du pic, la résilience après $t_m + 2T_p$ peut être ajustée par la fonction linéaire $q(t)$:

$$q(t) = A_r - a_r (t - t_m) \quad (\text{A.4})$$

où A_r est l'amplitude dans le temps $t = t_m$ avec la pente $-a_r$ et la largeur de l'impulsion T_p à l'amplitude $A_m / 2 + A_r / 4$. On obtient ensuite

$$A = \frac{2A_r}{(2A_m - A_r)T_p} \quad \text{et} \quad a = \frac{a_r}{A_r} \quad (\text{A.5})$$

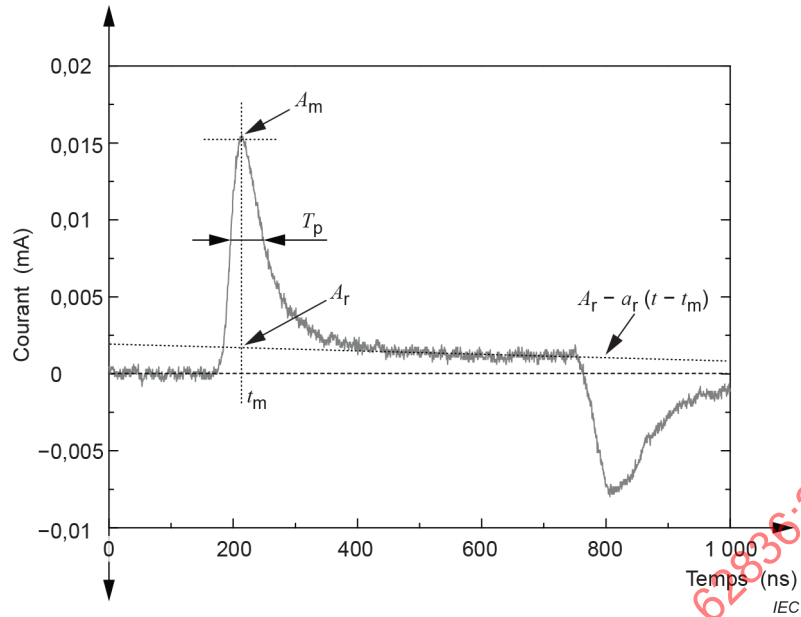


Figure A.5 – Caractéristiques géométriques du signal de référence pour l'estimation des coefficients de correction

Dans le cas du signal représenté sur la Figure A.3, les valeurs des coefficients sont les suivantes:

$$A_m = 3,05 \mu\text{A};$$

$$A_r = 0,31 \mu\text{A};$$

$$1/a_r = 4\,670 \text{ ns}/\mu\text{A};$$

$$1/a = 1\,452 \text{ ns};$$

$$1/A = 357 \text{ ns};$$

$$T_p = 57,8 \text{ ns}.$$

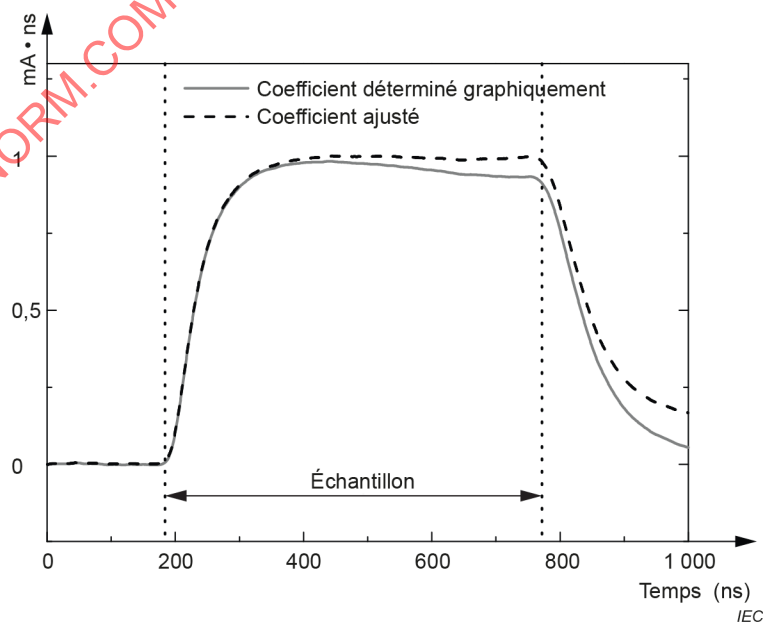


Figure A.6 – Signal de référence corrigé à l'aide d'un coefficient déterminé graphiquement et d'un coefficient ajusté

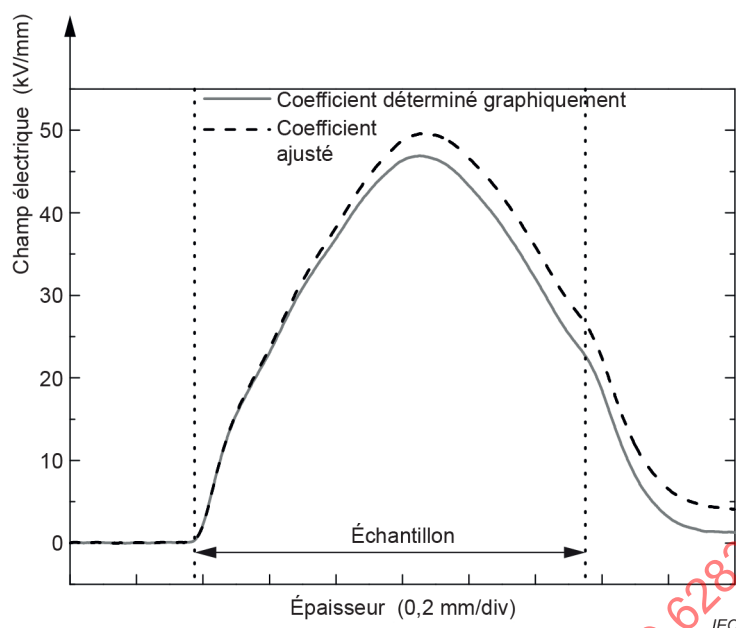


Figure A.7 – Champ électrique dans un échantillon sous tension appliquée et avec charges d'espace, calculé à l'aide d'un coefficient déterminé graphiquement et d'un coefficient ajusté

Il peut être noté que les coefficients a et A n'ont pas une influence significative sur la correction; il n'est donc pas nécessaire de les estimer avec précision. La Figure A.6 représente le signal de référence corrigé, obtenu à partir du signal d'origine de la Figure A.5. La Figure A.7 montre l'étalonnage avec les anciennes valeurs des coefficients A avec $1/A = 537$ ns et $1/A = 688$ ns, respectivement. Une variation de 22 % du coefficient A induit ici une variation de 3,3 % du champ électrique seulement.

A.5 Code MATLAB®¹

Des variantes aux symboles utilisés dans le texte ci-dessus ont été adoptées afin de les expliciter et d'éviter toute confusion dans le code MATLAB®. Les symboles et leurs variantes sont indiqués dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 – Variantes des symboles utilisés dans le texte

Symboles utilisés dans le texte	A_m	t_m	A_r	a_r	T_p	E_0
Variantes correspondantes utilisées dans le code	Am	tm	Ar	ar	Tp	E0

Soit ref le signal de référence (en ligne) et sig le signal (en ligne) à partir duquel est calculé le champ électrique généré dans l'échantillon. La longueur de ces signaux est N . Soit A_m et t_m l'amplitude et la durée de la valeur maximale du premier pic de ref et d' A_r , respectivement. Soit a_r la fonction linéaire $A_r - a_r * (t - t_m)$ qui ajuste la résilience en ref . Enfin, soit T_p la largeur d'impulsion de référence à l'amplitude $A_m/2 + A_r/4$ et E_0 le champ électrique modéré sous lequel a été obtenu le signal de référence. Le signal corrigé c_{ref} et le signal intégré c_{sig} obtenus à partir de ref et sig sont calculés comme suit

$$A = 2 * A_r / (2 * A_m - A_r) / T_p;$$

¹ MATLAB est la marque d'un produit distribué par The MathWorks Inc. Cette information est donnée à l'intention des utilisateurs du présent document et ne signifie nullement que l'IEC approuve l'emploi du produit ainsi désigné.

```

a = ar/Ar;
cref = conv(ref,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
cref = cref(1:N);
csig = conv(sig,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
csig = csig(1:N);

```

Le champ électrique est ensuite calculé à partir de csig et cref comme suit

$$E = E_0 * \text{csig} / \text{cref}.$$

De toute évidence, ce calcul n'est valable que pour l'échantillon. Il s'écarte en effet lorsque cref s'approche de zéro. Afin d'obtenir de meilleurs résultats, le plateau de cref peut être interpolé à l'aide d'une fonction linéaire. Soit id1 et id2 deux points du plateau de cref, où id1 est plus proche du début de l'échantillon et id2 est proche de la fin de l'échantillon. L'interpolation icref de cref et le champ électrique résultant sont alors déterminés comme suit:

```

icref = polyval(polyfit(id1:id2,cref(id1:id2),1),1:N);
E = E0 * csig / icref.

```

En variante, le coefficient A peut être optimisé afin d'obtenir un plateau plat pour cref et donc une seule constante pour la division. Le coefficient A peut, par exemple, être optimisé comme suit:

```

x = fminunc(@(x)Criteria(x,A,a,ref,id1:id2),1);
A = x*A;
cref = conv(ref,1-A*(1-exp(-(a+A)*(0:N-1)))/(a+A));
cref = cref(1:N);
E = E0 * csig / cref(id2);

with

function xs = Criteria(x,A,a,r,t)
rc = conv(r,x*A*exp(-(x*A+a)*(0:length(r)-1)));
rc = r-rc(1:length(r));
xs = mean(abs(rc(t))).

```

Annexe B (informative)

Vérification de la linéarité du système de mesure

B.1 Vérification de la linéarité

La linéarité du système de mesure peut être vérifiée à tout moment et à n'importe quelle température, si nécessaire, ou à une fréquence donnée, par exemple au minimum une fois par an. La limite de linéarité minimale suggérée par le coefficient de corrélation linéaire pour la méthode PWP est de 0,980. Si la linéarité du système de mesure est inférieure à la limite, il est nécessaire de vérifier le système de mesure.

B.2 Conditions d'échantillonnage

Une plaque en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) d'une épaisseur de 1,0 mm avec des plaques en EVA chargées en carbone de 0,6 mm d'épaisseur, collées thermiquement sur les deux faces, est utilisée pour mesurer la linéarité. La méthode de mesure est la même que celle décrite à l'Article 7 et à l'Article 9.

B.3 Procédure de vérification de la linéarité

- 1) L'échantillon en PMMA est mis en court-circuit pendant environ 4 h à une température donnée. Les électrodes de chaque échantillon sont reliées ensemble pour éliminer l'effet des charges résiduelles avant l'essai.
- 2) Avant les mesurages, plusieurs impulsions laser sont appliquées sur la cible afin d'éliminer la poussière éventuellement présente sur la surface de l'électrode.
- 3) Il convient de mesurer un signal sans tension continue appliquée afin de confirmer l'absence de charges d'espace dans l'échantillon. Si des charges d'espace sont observées, il est nécessaire de préchauffer la surface de l'échantillon (par exemple, en mettant l'échantillon en court-circuit à 40 °C pendant 4 h) avant d'engager l'étape suivante. Il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesurages pour le moyennage des signaux afin d'augmenter le rapport S/N (rapport signal/bruit) du signal. Il est suggéré d'appliquer deux impulsions laser distinctes pour le moyennage, en respectant un intervalle d'environ 2 s, comme cela est indiqué dans le présent Article B.3.
- 4) Les signaux sous des tensions continues appliquées de 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV et 40 kV sont mesurés successivement. Après chaque mesurage, la tension appliquée est rapidement abaissée à zéro. L'intervalle de temps entre chaque mesurage est d'environ 1 min.

B.4 Exemple de vérification de la linéarité

Les signaux de tension mesurés en aval de l'amplificateur sont représentés sur la Figure B.1 pour des tensions continues appliquées de 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV et 40 kV. La Figure B.2 représente les signaux de courant mesurés induits par l'échantillon; un amplificateur est utilisé dans le système de mesure.

Selon l'Équation (11), pour un échantillon sans charges dans la masse, le champ électrique est proportionnel à la valeur des pics de courant aux bornes des deux électrodes. L'Annexe A montre qu'une procédure de correction doit être effectuée sur le signal de courant mesuré avant d'engager le processus d'étalonnage, en raison du phénomène de résilience. Toutefois, le pic de courant aux bornes de la première électrode ne varie quasiment pas après la procédure de correction, comme cela est représenté sur la Figure A.3. Par conséquent, l'amplitude de crête du courant mesuré aux bornes de la première électrode peut être utilisée directement pour vérifier la linéarité du système de mesure. La Figure B.3 montre la relation entre l'amplitude de crête du courant mesuré aux bornes de la première électrode et la tension appliquée. La Figure B.3 représente également un ajustement linéaire de l'amplitude de crête du courant mesuré aux bornes de la première électrode, sous tension appliquée. En outre, le coefficient de corrélation linéaire est de 0,999 dans cet exemple.

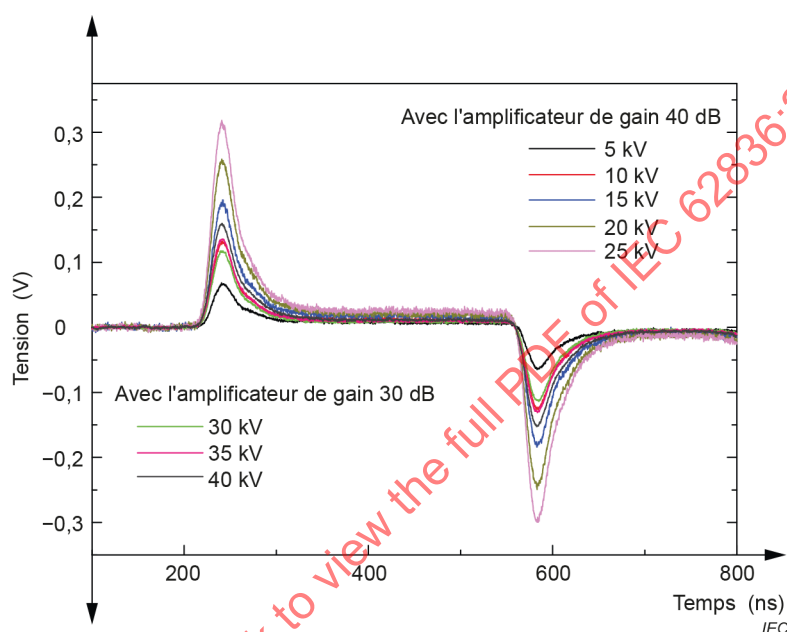


Figure B.1 – Signaux de tension mesurés par l'amplificateur avec différents gains et enregistrés par l'oscilloscope

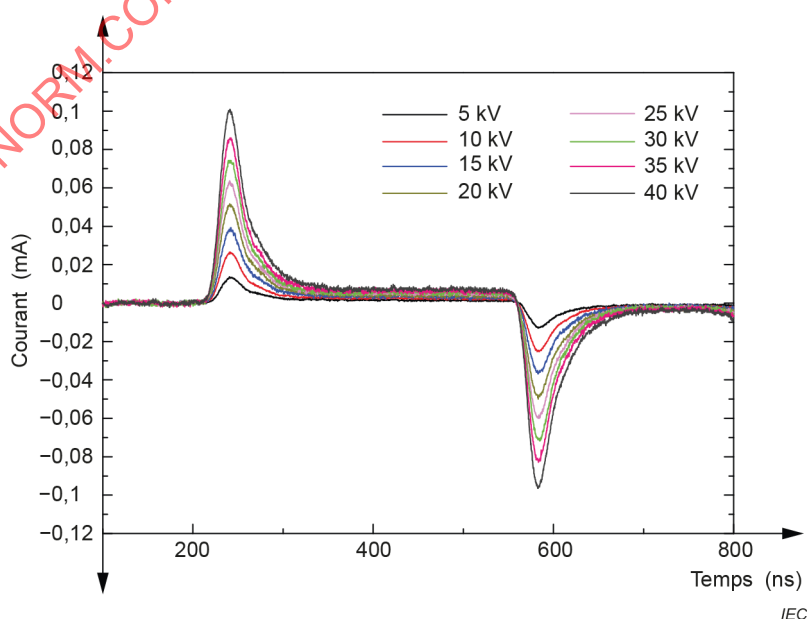


Figure B.2 – Signaux de courant induits par l'échantillon, en fonction de l'impédance d'entrée et du gain de l'amplificateur