

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –
Part 1-2: Encapsulants – Measurement of volume resistivity of photovoltaic
encapsulants and other polymeric materials**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules
photovoltaïques –
Partie 1-2: Encapsulants – Mesurage de la résistivité transversale des
encapsulants photovoltaïques et autres matériaux polymères**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2016 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 Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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: csc@iec.ch.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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 aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules –
Part 1-2: Encapsulants – Measurement of volume resistivity of photovoltaic
encapsulants and other polymeric materials**

**Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules
photovoltaïques –
Partie 1-2: Encapsulants – Mesurage de la résistivité transversale des
encapsulants photovoltaïques et autres matériaux polymères**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-3349-8

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.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references.....	6
3 Sampling	6
4 Apparatus.....	6
5 Procedure	7
5.1 Preconditioning	7
5.2 Test conditions.....	8
5.2.1 Room temperature	8
5.2.2 Elevated temperatures	8
5.3 Measurement voltage	8
5.3.1 Method A voltage	8
5.3.2 Method B voltage	9
5.4 Measurement cycle	9
5.4.1 Method A cycle	9
5.4.2 Method B cycle	9
5.5 Results	9
6 Test report.....	10
Annex A (informative) Historical studies of the volume resistivity of encapsulation materials	12
Annex B (informative) Example data.....	13
Bibliography	14
Figure 1 – Schematic of electrode apparatus for resistivity measurements	7
Figure B.1 – Example data showing current and voltage as a function of time for Method A measurement	13
Table B.1 – End of cycle current measurements and values used for calculation of volume resistivity according to Method A	13

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS
USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –****Part 1-2: Encapsulants –
Measurement of volume resistivity of
photovoltaic encapsulants and other polymeric materials**

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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62788-1-2 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/1085/FDIS	82/1105/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 62788 series, published under the general title *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules*, can be found on the IEC website.

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

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

MEASUREMENT PROCEDURES FOR MATERIALS USED IN PHOTOVOLTAIC MODULES –

Part 1-2: Encapsulants – Measurement of volume resistivity of photovoltaic encapsulants and other polymeric materials

1 Scope

This part of IEC 62788 provides a method and guidelines for measuring the volume resistivity of materials used as encapsulation, edge seals, front-sheets, backsheets, or any other insulating material in a photovoltaic (PV) module. The test is performed on dry, humid or wet preconditioned samples. In the case of frontsheets and backsheets comprised of multiple layers, the measured resistivity is an effective value. This test is designed for room temperature measurement, but can also be utilized at higher temperatures.

Degradation of PV modules is known to occur in part by electrochemical corrosion, and other potential induced degradation processes. These processes may be dependent upon the resistivity of a polymeric component. Therefore, the DC resistivity of polymeric components is relevant to module design and durability in the field. The resistivity may depend on cure state, temperature, water content, and voltage history. A number of options are included to allow the measurement to be performed in a manner consistent with representative fielded module conditions.

Most resistivity measurement methods and equipment typically become inaccurate and variable for materials with volume resistivity above $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$ [5]¹. Therefore, this standard is used for measurements less than $1\cdot 10^{17} \Omega\cdot\text{cm}$.

Both monolithic and multilayer materials (e.g. frontsheets and backsheets) are suitable for measurement. Methods are described for room temperature measurement, with guidelines included for testing at elevated temperatures.

Results will vary with moisture content, therefore materials should be tested in a manner anticipatory of usage. Preconditioning procedures for dry, humid and wet environments are included.

Depending on the material, voltage history will affect the measured result. The rate of change of current, and time to equilibrium varies with material often taking hours or days to come to a static level. For this reason, long and short duration methods are included (Methods A and B). The specified short-duration alternating polarity Method B is intended for qualitative comparison. Method A, long-duration on/off polarity, is recommended for characterization with regard to PID resistance.

Measurements obtained using either method may be used by material manufacturers for the purpose of quality control of their electrical insulating material as well as for reporting in product datasheets. PV module manufacturers may use these methods for the purpose of material acceptance, material selection, process development, design analysis, or failure analysis.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

This measurement method can also be utilized to monitor the performance of electrical insulating materials after weathering, to assess their durability.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 61340-2-3:2000, *Electrostatics – Part 2-3: Methods for test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation*

IEC 62631-3-2:2015, *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials – Part 3-2: Determination of resistive properties (DC methods) – Surface resistance and surface resistivity*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

ASTM D 257-14, *Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*

3 Sampling

Thin polymer films or laminates (< 2 mm thick) shall be used as test samples. A thickness of 0,5 mm is presently typical in PV encapsulant and edge seal applications and is the suggested thickness to be used in this standard for those materials. Thickness should not vary more than 10 % across the sample. For backsheet or front-sheet materials, the specimens should be in the form and thickness supplied by the manufacturer, typically between 0,15 mm and 0,30 mm. Samples should be cured, or processed as would be typical for that material, (if applicable) according to the manufacturer's specification. Sample surfaces should be smooth which may require curing (or thermal treatment) while being held between flat, planar surfaces.

Encapsulants may optionally be laminated on one side to a metal foil to substitute for the second larger electrode in the test apparatus. In particular, the laminated foil (*e.g.* Al, Cu, stainless steel, or other metals) may improve the handling of a soft gel material. Measurements will be made using 5 replicates for each measurement. To prevent spurious results from effects such as sample charging, samples should be measured only once and discarded.

4 Apparatus

Use two flat metal plate electrodes (Electrodes No. 1 and No. 3 in Figure 1) connected to an electrometer, as specified for flat specimens in IEC 62631-3-2:2015, IEC 61340-2-3:2000, or ASTM D257-14. The instrument shall be able to measure down to 1 nA resolution or lower. One electrode (electrode No. 1 in Figure 1) shall be circular with a diameter of $d_1 = (50 \pm 1)$ mm and the other will be larger, and shall completely cover the first (electrode No. 3 in Figure 1). Additionally, a guard electrode (Electrode No. 2 in Figure 1) shall be connected to ground during testing. The guard electrode helps to minimize noise from stray electrical currents. The gap (g in Figure 1) between electrodes 1 and 2 shall be between 1 mm and 10 mm. The polymer sample area shall be larger than the smaller electrode and large enough to span the gap to the guard electrode ($d_4 > d_1$ by 2 mm to 6 mm). Electrically conductive rubber can be used with metal electrodes to help ensure a good electrical connection. Because conductive pastes can contaminate the samples affecting the resistivity measurement, they shall not be used in these measurements.

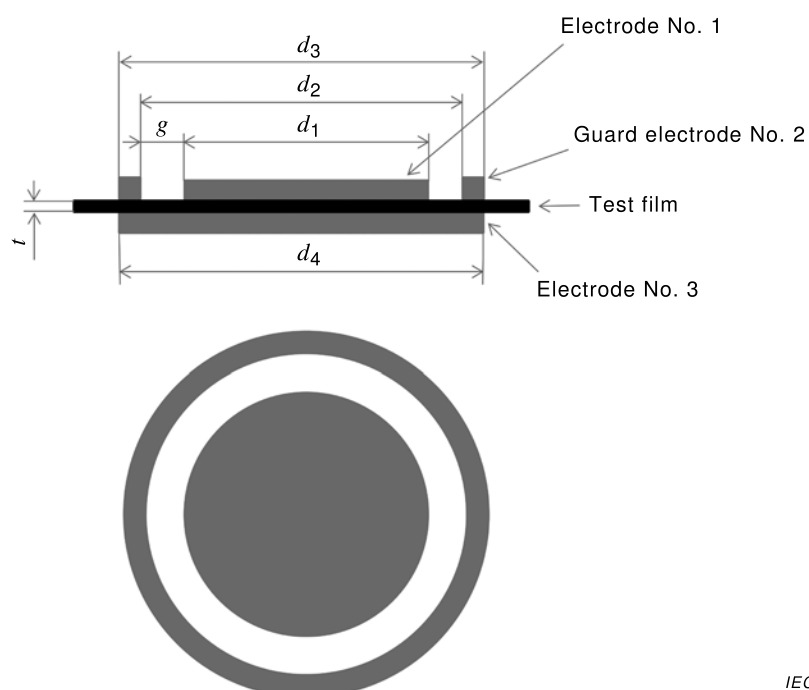


Figure 1 – Schematic of electrode apparatus for resistivity measurements

If there is an electrically conductive layer embedded in the backsheet, the two electrodes shall be of the same area and a guard electrode (electrode No. 2) will not be used. With this setup, care shall be taken to ensure that film material extending beyond the two test electrodes does not achieve spurious electrical connection, i.e. in Figure 1, electrodes No. 1 and No. 3 shall have the same area and the test film cannot contact electrode No. 2.

Make sure there is sufficient pressure on the sample from the electrode to make it lie flat. For example, a highly curved sample may require additional weight to be placed on the top electrode.

For samples laminated to a metal foil, the metal foil will be substituting for electrode 3 in Figure 1.

For most electrometers, accurate measurement above $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ is extremely difficult and often results in significant measurement uncertainty. Above this level, the measured currents are extremely small making accurate and reproducible measurement very difficult. Therefore caution should be used when measuring such highly resistive materials. This should include the use of proper shielding, triaxial cables, verification that connections are good, testing for reproducibility, and separation of current and voltage measurement circuits. Even with these precautions, and using measurement Method A, these measurements may approach theoretical measurement limits [5].

5 Procedure

5.1 Preconditioning

Test materials shall be preconditioned under one of the following conditions, and the method specified with the reported result.

- Desiccated: For dry resistance testing, precondition the 5 samples in a desiccated atmosphere ($\text{RH} < 5\%$) at $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ for a minimum of 48 h prior to testing.
- Saturated: For wet resistance testing, precondition the 5 samples by placing them in an enclosed container with liquid water in it, (the samples shall not be in direct contact with

the water) at $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ for a minimum of 48 h prior to testing. This may be accomplished using a typical desiccator jar. Simply place water in the bottom of the jar where there would normally be desiccant.

- c) Laboratory ambient: Preconditioned in laboratory air at $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ and $(50 \pm 5) \% \text{RH}$ for a minimum of 48 h prior to testing. Alternatively, a humidity controlled chamber may be used.

For some classes of materials, such as desiccant filled edge seals, it may take significantly more than 48 h for them to equilibrate. In this case verification of equilibrium is required.

If the samples are laminated to a metal foil on one side, then they shall be equilibrated for 96 h instead of 48 h. While being conditioned, samples cannot be stacked on top of each other and shall have air gaps of at least 2 mm between samples. The specimens shall be placed in the test fixture immediately after being removed from the preconditioning chamber.

Because the samples are in intimate contact with gas impermeable electrodes, it is not expected that the moisture content will change substantially over the course of the experiment. For the dry condition, this may be minimized by placing the test fixture in a dry environment or including desiccant in the fixture. Similarly, conducting the experiment at 50 % RH in a lab or chamber at 50 % RH will eliminate this concern for humid samples.

The thickness of each test specimen shall be measured post-conditioning, prior to testing. The thickness shall be taken as the average of three measurements obtained at different locations on the specimen.

5.2 Test conditions

5.2.1 Room temperature

Measurements shall be carried out at $T = (23 \pm 2) ^\circ\text{C}$; T and RH included in test report. Because the diffusion of water in most polymers is not sufficient to significantly dry out a sample placed between two impermeable electrodes, the atmosphere does not need to be kept at the preconditioned RH setpoint. However, the annular region (the area g in Figure 1 which is typically around 15 % of the area) does contribute slightly to the conductivity and may contribute a small negligible error to the measurement,

5.2.2 Elevated temperatures

Because resistivity can vary by many orders of magnitude within the operating range of a PV module, its dependence on temperature may be useful. Elevated temperature measurements are recommended at $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$, $(60 \pm 2) ^\circ\text{C}$ and $(85 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

To avoid complications from the sample drying out during the course of the test, pre-conditioning using the “dry” method, at the temperature of the test, is recommended,

For measurement of volume resistivity at elevated temperatures with “humid” or “wet” preconditioned samples, the samples shall be preconditioned at the target temperature, and the test carried out with test fixture in an environmental chamber, with the same RH as for preconditioning.

NOTE At elevated temperatures, some materials may go through a melt transition causing them to adhere to and/or contaminate the test cell. Similarly, elevated temperature could cause materials to flow and deform unacceptably altering the results.

5.3 Measurement voltage

5.3.1 Method A voltage

Measure the resistance (R) at $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, with applied voltage (V) of $(1\,000 \pm 10) \text{ V DC}$. If sample thicknesses greater than 0,75 mm or less than 0,15 mm are used, the applied voltage

for measurement shall be adjusted such that a 2 000 V/mm electric field is applied during measurement. If the material is intended for higher voltage systems, test at the highest rating voltage. If voltages, other than 1 000 V are used, this should be noted in the test report.

For this method, the voltage will be cycled between a positive voltage and a zero voltage condition. Here $V_{\max} = V$ and $V_{\min} = 0$.

5.3.2 Method B voltage

Method B uses $\pm (1\,000 \pm 5)$ V DC for the measurement of all films. The voltage is cycled alternatively from a positive to negative polarity. Here $V_{\max} = +V = + (1\,000 \pm 5)$ V and $V_{\min} = -V = - (1\,000 \pm 5)$ V.

5.4 Measurement cycle

5.4.1 Method A cycle

For method A use a 1 h cycle time. The the 1 h cycle is intended for datasheet reporting. The measurement will consist of a 1 h “on” cycle at the test voltage ($V_{\max}$) of 1 000 V followed by a 1 h “off” cycle at 0 V and repeated. For thicker samples, the voltage will be set such that the electric field is 2 000 V/mm.

5.4.2 Method B cycle

For method B use a 1 min cycle time. The 1 min cycle is intended to be used for quality control or process control. Here the voltage is cycled between $+(1\,000 \pm 5)$ V and $-(1\,000 \pm 5)$ V.

5.5 Results

Current measurements will be recorded at the end of the cycles. The current at the end of the first cycle (I_1) will be discarded, but the next four (I_2, I_3, I_4, I_5) will be recorded. To minimize the effects of background currents, a weighted average (I_{Ave}) for current will be calculated as follows [3];

$$I_{Ave} = \frac{[-I_2 + 3I_3 - 3I_4 + I_5]}{8} \quad (1)$$

NOTE 1 Because PV modules are exposed to high voltages for long periods of time, followed by no voltage for long periods of time (at night), an on/off method of measurement is used to produce values that represent the application use.

Here I_2, I_3, I_4 and I_5 , are sequential current measurements from voltage-on, and voltage-off conditions in Method A, and alternating polarity voltages in Method B. The volume resistivity (ρ) is determined from the formula:

$$\rho = \frac{(V_{\max} - V_{\min})A}{2I_{Ave} \cdot t} \quad (2)$$

For Method A $V_{\max}$ represents the applied “on” voltage, $V_{\min}$ represents the applied “off” voltage (0 V in this case). For Method B $V_{\max}$ is a positive voltage and $V_{\min}$ is a negative voltage. Here, t is the specimen thickness and A is the effective area of the smaller electrode given by,

$$A = \pi \frac{(d_1 + g)^2}{4} \quad (3)$$

where g is the gap for the guard electrode and d_1 is the diameter of the test electrode, Figure 1.

Because the first cycle is discarded, this measurement should take 5 h to perform for method A or 5 min for method B. If in doubt about the operation of an instrument, use method B, noting the total test time, to verify operation of the instrument.

NOTE 2 This measurement averaging technique helps to eliminate a constantly changing background current and is often automatically implemented in commercial electrometers. Method B typically is a standard protocol for electrometers. Method A can be implemented by setting the electrometer to measure in alternating polarity mode with a 500 V alternating voltage with a 500 V DC offset to produce a 1 000 V/0 V “on/off” measurement pattern. Many commercial instruments will automatically throw out the first measurement.

NOTE 3 It is also common for electrometers to use formula (1) to calculate an average current. When typical electrometers use the alternating polarity method, it is the alternating polarity method voltage that is in the calculation of volume resistivity. Typical electrometers do not consider the offset voltage in the calculation of volume resistivity, and the calculation formula does not have the factor of $\frac{1}{2}$ as is used in formula (2). Because $V_{\max}$ is twice the value of the alternating polarity voltage programmed in the electrometer to produce the “on/off” voltage, these factors cancel out and typical electrometers will compute values equivalent to formula (2).

In the case where the measured current is less than 2 nA, it may be necessary to disengage the ‘autorange’ feature on the electrometer in order to obtain valid measurements.

If during the course of the measurements, a negative value for current is measured, except when for when $V=0$, for any of the cycles, even for the most sensitive instrument current range, then the test specimen cannot be measured with the instrument set-up. In this case, the limitations of the instrument should be determined separately and one should report the resistivity as simply greater than the instrument measurement capability. This instrumental resolution for a well shielded instrument and test fixture is determined using the value of the lowest current range and sample geometry in formulas (1), (2) and (3). In determining the lowest current range, one should make sure environmental noise does not practically limit the instrumental setup to a higher current ranges.

All measurements (reported to 2 significant figures) will be taken as the average ρ , in $\Omega\cdot\text{cm}$, of 5 samples along with the standard deviation of the measurements. Results greater than or equal to $1\cdot 10^{17} \Omega\cdot\text{cm}$ shall be reported as greater than $1\cdot 10^{17} \Omega\cdot\text{cm}$.

6 Test report

A certified report of the tests, with measured performance characteristics, shall be prepared by the test agency in accordance with ISO/IEC 17025. The report shall contain the detail specification for the material. Each certificate or test report shall include at least the following information:

- a) a title;
- b) name and address of the test laboratory and location where the tests were carried out;
- c) unique identification of the certification or report and of each page;
- d) name and address of client, where appropriate;
- e) description and identification of the item tested, including specimen thickness;
- f) characterization and condition of the test item; including the method and details of specimen preparation (including curing, lamination, or similar processing, if applicable), measurement temperature and preconditioning temperature and RH;
- g) date of receipt of test item and date(s) of test, where appropriate;
- h) identification of test method used (Method A or B);
- i) reference to sampling procedure, where relevant;
- j) any deviations from, additions to, or exclusions from, the test method and any other information relevant to a specific tests, such as environmental conditions or voltage;

- k) measurements, examinations and derived results supported by tables, graphs, sketches and photographs as appropriate including the resistivity measured for both the wet, 50 % RH, and dry conditioned specimens at room temperature and at any other temperatures measured. Report the average and standard deviation;
- l) for specimens composed of multiple layers, indicate that the measured resistivity is an effective bulk resistivity;
- m) a statement of the estimated uncertainty of the test results (where relevant);
- n) a signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the certificate or report, and the date of issue;
- o) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested;
- p) a statement that the certificate or report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

Annex A

(informative)

Historical studies of the volume resistivity of encapsulation materials

Degradation of PV modules is known to proceed in part by electrochemical corrosion, which depends upon the resistivity of the encapsulation used. The encapsulation must also limit ion flow (e.g., when wet) to prevent degradation induced by electrical potential or polarization. Historical data related to the volume resistivity of photovoltaic encapsulation materials may be found in references [1] and [2] of the bibliography. For PV applications it is commonly found that increasing the encapsulant resistivity from $10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$ to about $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$ can significantly reduce concerns with potential induced degradation, but higher resistivities produces smaller to negligible improvements [4].

Annex B (informative)

Example data

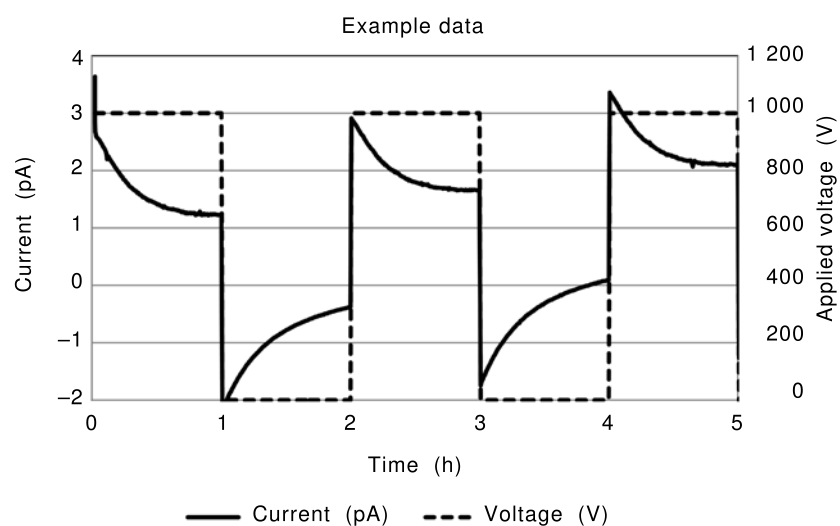


Figure B.1 – Example data showing current and voltage as a function of time for Method A measurement

Table B.1 – End of cycle current measurements and values used for calculation of volume resistivity according to Method A

Measured currents and calculated data		
$I_1 =$	1,2	(pA)
$I_2 =$	–0,38	(pA)
$I_3 =$	1,7	(pA)
$I_4 =$	0,0093	(pA)
$I_5 =$	2,1	(pA)
$I_{ave} =$	0,89	(pA)
$2 \cdot I_{ave} =$	1,8	(pA)
$t =$	0,46	(mm)
$V_{max} =$	1 000	(V)
$A =$	20,5	(cm ²)
$\rho =$	$2,5 \times 10^{17}$	($\Omega \cdot \text{cm}$)

Bibliography

- [1] G. R. Mon and R. G. Ross, "Electrochemical degradation of amorphous-silicon photovoltaic modules," in *Proceedings of the 18th IEEE PV Specialists Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, 1985, pp. 1142-1149
 - [2] G. Mon, L. Wen, J. Meyer, R. Ross, Jr., and A. Nelson, "Electrochemical and galvanic corrosion effects in thin-film photovoltaic modules", in *Photovoltaic Specialists Conference, 1988, Conference Record of the Twentieth IEEE*, 1988, pp. 108-113, vol.1
 - [3] Adam Daire, "Improving the Repeatability of Ultra-High Resistance and Resistivity Measurements", *White paper by Keithley Instruments*, 2001
 - [4] C. Reid, S. Ferrigan, I. Fidalgo, and J. T. Woods, "Contribution of PV Encapsulant Composition to Reduction of Potential Induced Degradation of Crystalline Silicon PV Cells," *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2013
 - [5] Keithley, *Low Level Measurements Handbook: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements*, 7th Edition, 2013, 1-245
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	17
1 Domaine d'application.....	19
2 Références normatives	20
3 Échantillonnage	20
4 Appareillage	21
5 Procédure	22
5.1 Préconditionnement	22
5.2 Conditions d'essai	22
5.2.1 Température ambiante	22
5.2.2 Températures élevées.....	23
5.3 Tension de mesure.....	23
5.3.1 Tension pour la méthode A.....	23
5.3.2 Tension pour la méthode B.....	23
5.4 Cycle de mesure	23
5.4.1 Cycle pour la méthode A	23
5.4.2 Cycle pour la méthode B	23
5.5 Résultats	24
6 Rapport d'essai	25
Annexe A (informative) Études menées sur la résistivité transversale des matériaux d'encapsulation.....	27
Annexe B (informative) Exemple de données.....	28
Bibliographie	29
Figure 1 – Schéma de l'appareillage d'électrodes pour les mesurages de la résistivité	21
Figure B.1 – Exemple de données indiquant le courant et la tension en fonction du temps pour la méthode A de mesure	28
Tableau B.1 – Mesurages et valeurs du courant de fin de cycle utilisés pour le calcul de la résistivité transversale conformément à la méthode A	28

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS
DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –****Partie 1-2: Encapsulants –
Mesurage de la résistivité transversale des
encapsulants photovoltaïques et autres matériaux polymères**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique 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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62788-1-2 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/1085/FDIS	82/1105/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62788, publiées sous le titre général *Procédures de mesure des matériaux utilisés dans les modules photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. À cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

PROCÉDURES DE MESURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 1-2: Encapsulants – Mesurage de la résistivité transversale des encapsulants photovoltaïques et autres matériaux polymères

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62788 fournit une méthode et des lignes directrices pour la mesure de la résistivité transversale des matériaux utilisés comme matériaux d'encapsulation, joints d'étanchéité périphériques, couches avant et couches arrière, ou tout autre matériau isolant dans un module photovoltaïque (PV). L'essai est effectué sur des échantillons préconditionnés secs, humides ou mouillés. Dans le cas des couches avant et des couches arrière qui comprennent plusieurs couches, la résistivité mesurée est une valeur efficace. Cet essai est conçu pour un mesurage à la température ambiante, mais il peut également être utilisé à des températures plus élevées.

Il est admis que la dégradation des modules photovoltaïques est due partiellement à une corrosion électrochimique et à d'autres procédés de dégradation induite par des potentiels. Ces procédés peuvent dépendre de la résistivité d'un composant polymère. Par conséquent, la résistivité en courant continu des composants polymères est significative par rapport à la conception du module et à sa durabilité sur le terrain. La résistivité peut dépendre du degré de durcissement, de la température, de la teneur en eau et de l'historique de tension. Plusieurs options sont introduites qui permettent de réaliser un mesurage dans une configuration similaire d'utilisation d'un module dans des conditions pratiques représentatives.

Dans la plupart des cas, les méthodes et les équipements de mesure de la résistivité ne donnent généralement plus des résultats exacts et stables lorsqu'ils s'appliquent à des matériaux dont la résistivité transversale est supérieure à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [5]¹. Par conséquent, la présente norme est utilisée pour les mesurages de moins de $1 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$.

Le mesurage s'applique aux matériaux aussi bien monolithiques que multicouches (par exemple les couches avant et les couches arrière). Les méthodes décrites concernent le mesurage à température ambiante, mais comportent également des lignes directrices pour les essais effectués à des températures élevées.

Les résultats varient selon la teneur en eau, il convient par conséquent de soumettre les matériaux à l'essai avant leur utilisation. Des procédures de préconditionnement sont spécifiées pour les environnements secs, humides et mouillés.

Selon le matériau, l'historique de tension peut affecter la mesure obtenue. Le taux de variation du courant et le temps pour atteindre l'équilibre varient en fonction du matériau ce qui peut souvent durer des heures ou des jours pour parvenir à un niveau stable. C'est la raison pour laquelle deux méthodes sont spécifiées: la méthode A de longue durée et la méthode B de courte durée. La méthode B, indiquée pour les polarités alternatives de courte durée, est destinée aux comparaisons qualitatives. La méthode A, adaptée aux polarités sous tension/hors tension de longue durée, est recommandée pour la caractérisation concernant la résistance PID.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

Les mesurages réalisés avec l'une ou l'autre méthode peuvent être utilisés par les fabricants de matériaux pour contrôler la qualité de leur matériau isolant électrique et pour renseigner les fiches techniques des produits. Les fabricants de modules photovoltaïques peuvent utiliser ces méthodes à des fins d'acceptation et de sélection de matériaux, d'élaboration de procédés, d'analyse de conception ou d'analyse de défaillance.

Cette méthode de mesure peut également servir à contrôler les performances des matériaux isolants électriques après exposition aux intempéries afin d'évaluer leur durabilité.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61340-2-3:2000, *Électrostatique – Partie 2-3: Méthodes d'essais pour la détermination de la résistance et de la résistivité des matériaux plans solides destinés à éviter les charges électrostatiques*

IEC 62631-3-2:2015, *Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides – Partie 3-2: Détermination des propriétés résistives (méthodes en courant continu) – Résistance superficielle et résistivité superficielle*

ISO/IEC 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

ASTM D 257-14, *Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*

3 Échantillonnage

Des films ou stratifiés polymères minces (épaisseur < 2 mm) doivent être utilisés comme échantillons d'essai. Une épaisseur de 0,5 mm est actuellement typique des applications sur les encapsulants photovoltaïques et les joints d'étanchéité périphériques. Il s'agit de l'épaisseur proposée dans la présente norme à utiliser pour ces matériaux. Il convient que l'épaisseur ne varie pas de plus de 10 % sur l'ensemble de l'échantillon. Pour les matériaux de couche arrière ou de couche avant, il convient que la forme et l'épaisseur des éprouvettes correspondent à celles fournies par le fabricant, généralement entre 0,15 mm et 0,30 mm. Il convient que les échantillons soient durcis ou traités (s'il y a lieu) selon le traitement généralement appliqué au matériau selon la spécification du fabricant. Il convient que les surfaces des échantillons soient lisses, ce qui peut exiger leur durcissement (ou traitement thermique) lorsqu'elles sont maintenues entre des surfaces planes plates.

La stratification des encapsulants peut éventuellement être effectuée sur un côté d'une feuille métallique afin de remplacer la deuxième plus grande électrode dans l'appareillage d'essai. La feuille stratifiée (par exemple, Al, Cu, acier inoxydable ou autres métaux), notamment, peut améliorer le traitement d'un matériau gélifié doux. Les mesurages sont réalisés en utilisant 5 sous-échantillons à chaque mesurage. Afin d'éviter les résultats faussés issus d'effets tels que la charge des échantillons, il convient de mesurer les échantillons une seule fois puis de les mettre au rebut.

4 Appareillage

Utiliser deux électrodes à plaque métallique plane (électrodes n° 1 et n° 3 à la Figure 1) reliées à un électromètre, comme spécifié pour les éprouvettes planes décrites dans l'IEC 62631-3-2:2015, dans l'IEC 61340-2-3:2000 ou dans l'ASTM D257-14. L'instrument doit pouvoir effectuer des mesures jusqu'à une résolution inférieure ou égale à 1 nA. Une électrode (électrode n° 1 à la Figure 1) doit être circulaire d'un diamètre $d_1 = (50 \pm 1)$ mm, tandis que l'autre électrode plus grande doit couvrir complètement la première (électrode n° 3 à la Figure 1). De plus, une électrode "de garde" (électrode n° 2 à la Figure 1) doit être reliée à la terre pendant l'essai. Cette électrode permet de réduire le plus possible le bruit émis par les courants électriques vagabonds. L'espace (g à la Figure 1) entre les électrodes 1 et 2 doit mesurer entre 1 mm et 10 mm. La surface de l'échantillon polymère doit être plus grande que l'électrode la plus petite et suffisamment grande pour combler l'espace jusqu'à l'électrode de garde ($d_4 > d_1$ de 2 mm à 6 mm). Du caoutchouc électriquement conducteur peut être utilisé avec les électrodes métalliques pour assurer une connexion électrique correcte. Étant donné que les pâtes conductrices peuvent contaminer les échantillons et de ce fait affecter le mesurage de la résistivité, elles ne doivent pas être utilisées pour ces mesurages.

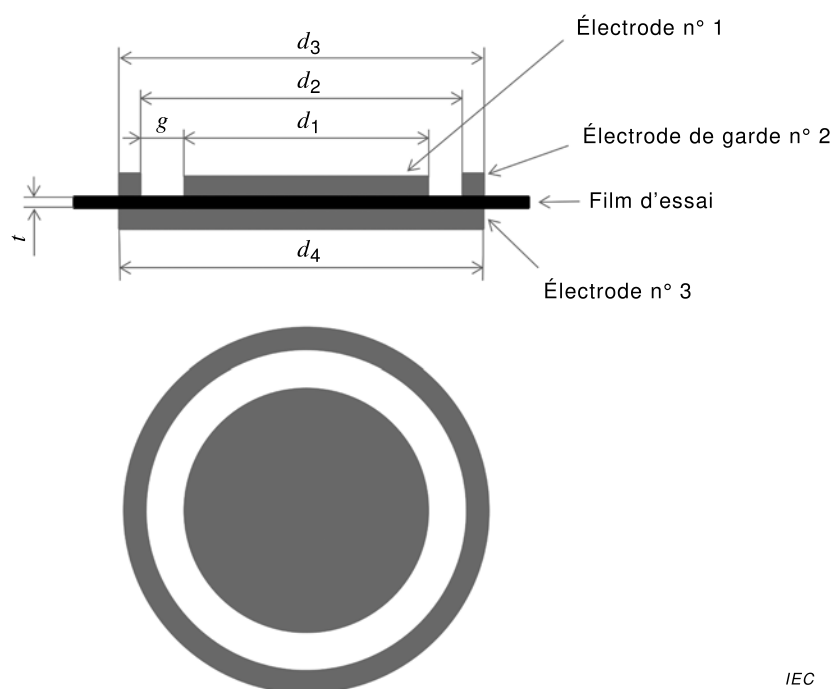


Figure 1 – Schéma de l'appareillage d'électrodes pour les mesures de la résistivité

Si une couche électriquement conductrice est intégrée à la couche arrière, les deux électrodes doivent avoir la même surface et une électrode de garde (électrode n° 2) n'est pas utilisée. Avec ce montage, il doit être vérifié que le matériau pelliculaire qui s'étend au-delà des deux électrodes d'essai n'établit pas une connexion électrique parasite, c'est-à-dire qu'à la Figure 1, les électrodes n° 1 et n° 3 doivent avoir la même surface et le film d'essai ne peut pas entrer en contact avec l'électrode n° 2.

S'assurer que l'électrode exerce une pression suffisante sur l'échantillon pour qu'il repose à plat. Par exemple, un échantillon fortement incurvé peut nécessiter de placer un poids supplémentaire sur l'électrode supérieure.

Pour les échantillons dont la stratification est effectuée sur une feuille métallique, la feuille métallique remplace l'électrode 3 à la Figure 1.

Pour la majeure partie des électromètres, un mesurage exact est extrêmement difficile à effectuer au-delà de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ et donne souvent lieu à une incertitude de mesure

significative. Au-delà de ce niveau, les courants mesurés sont extrêmement faibles, ce qui accentue la difficulté à effectuer un mesurage exact et reproductible. Par conséquent, il convient de faire preuve d'une grande prudence lors du mesurage de matériaux présentant une résistivité élevée. À cet effet, il convient d'utiliser des câbles triaxiaux blindés, de vérifier la qualité des connexions, d'effectuer des essais de reproductibilité et de séparer les circuits de mesure du courant et de la tension. Même lorsque ces précautions sont respectées, lors de l'application de la méthode de mesure A, le mesurage peut avoisiner les limites de mesure théorique [5].

5 Procédure

5.1 Préconditionnement

Les matériaux d'essai doivent être preconditionnés dans l'une des conditions suivantes et la méthode utilisée doit être indiquée dans le rapport d'essai.

- a) Conditions de dessiccation: Pour l'essai de résistance dans un environnement sec, preconditionner les 5 échantillons dans une atmosphère déshydratée ($HR < 5\%$) à une température de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ pendant 48 h au minimum avant l'essai.
- b) Conditions de saturation: Pour l'essai de résistance dans un environnement humide, preconditionner les 5 échantillons en les plaçant dans un récipient fermé rempli d'eau à l'état liquide (les échantillons ne doivent pas être en contact direct avec l'eau) à une température de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ pendant 48 h au minimum avant l'essai. Ceci peut être réalisé en utilisant une cuve de dessiccateur type. Verser simplement l'eau au fond de la cuve contenant normalement un déshydratant.
- c) Conditions ambiantes de laboratoire: Preconditionner les échantillons à l'air ambiant de laboratoire à une température de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ et une HR de $(50 \pm 5)\%$ pendant 48 h au minimum avant l'essai. En variante, une chambre à régulation d'humidité peut être utilisée.

Pour certaines classes de matériaux, tels que les joints d'étanchéité périphériques remplis de déshydratant, la durée nécessaire à leur équilibre peut être bien supérieure à 48 h. Dans ce cas, une vérification de l'équilibre est exigée.

Si la stratification des échantillons est effectuée sur un côté d'une feuille métallique, ces mêmes échantillons doivent alors être mis en équilibre pendant 96 h au lieu de 48 h. Pendant leur conditionnement, les échantillons ne peuvent pas être empilés les uns sur les autres, et doivent comporter des lames d'air intermédiaires d'au moins 2 mm. Les éprouvettes doivent être placées dans le montage d'essai immédiatement après leur retrait de la chambre de preconditionnement.

Dans la mesure où les échantillons sont en contact direct avec des électrodes imperméables aux gaz, une variation importante de la teneur en eau n'est pas prévue au cours de l'expérience. Pour les conditions d'essai à l'état sec, ceci peut être réduit le plus possible en plaçant le montage d'essai dans un environnement sec ou en intégrant un déshydratant dans le montage. De même, la réalisation de l'expérience en laboratoire ou dans une chambre avec une HR de 50 % permet de résoudre ce problème concernant les échantillons humides.

L'épaisseur de chaque éprouvette doit être mesurée après conditionnement, mais avant l'essai. L'épaisseur doit être prise comme la moyenne de trois mesurages effectués en différents emplacements sur l'éprouvette.

5.2 Conditions d'essai

5.2.1 Température ambiante

Les mesurages doivent être effectués à $T = (23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Le rapport d'essai doit comprendre la température (T) et l'humidité relative (HR). Pour la plupart des polymères, la diffusion de l'eau n'est pas suffisante pour sécher de façon significative un échantillon placé entre deux électrodes imperméables, il n'est donc pas nécessaire de maintenir l'atmosphère au point de

consigne initial d'humidité relative. Toutefois, la zone annulaire (la zone *g* à la Figure 1, qui avoisine généralement 15 % de la zone) contribue légèrement à la conductivité et peut engendrer une faible erreur de mesure négligeable.

5.2.2 Températures élevées

Dans la mesure où la variation de la résistivité s'étend sur de nombreux ordres de grandeur au sein de la plage de fonctionnement d'un module photovoltaïque, sa dépendance par rapport à la température peut être utile. Il est recommandé d'effectuer les mesurages à des températures élevées de $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$, $(60 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et $(85 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Afin d'éviter les complications dues à l'assèchement de l'échantillon au cours de l'essai, il est recommandé d'appliquer, lors du préconditionnement, la méthode "à l'état sec" à la température de l'essai.

Pour le mesurage de la résistivité transversale à des températures élevées sur des échantillons préconditionnés "humides" ou "mouillés", les échantillons doivent être préconditionnés à la température cible et l'essai doit être effectué en plaçant le montage d'essai dans une enceinte climatique et avec la même HR que pour le préconditionnement.

NOTE À des températures élevées, certains matériaux peuvent fondre, ce qui engendre leur adhérence à la cellule d'essai et/ou la contamination de la cellule d'essai. De même, une température élevée peut provoquer l'écoulement et une déformation inacceptable des matériaux et altérer de ce fait les résultats.

5.3 Tension de mesure

5.3.1 Tension pour la méthode A

Mesurer la résistance (R) à une température de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, en appliquant une tension (V) de $(1\,000 \pm 10) \text{ V}$ en courant continu. Si des épaisseurs d'échantillons de plus de 0,75 mm ou de moins de 0,15 mm sont utilisées, la tension appliquée pour le mesurage doit être ajustée de manière à appliquer un champ électrique de 2 000 V/mm pendant le mesurage. Si le matériau est destiné à être utilisé dans des systèmes à tension plus élevée, effectuer l'essai à la tension assignée la plus élevée. Il convient de noter dans le rapport d'essai toute utilisation de tensions autres qu'une tension de 1 000 V.

Pour cette méthode, les conditions de tension varient entre une tension positive et une tension nulle. Dans le cas présent, $V_{\text{max}} = V$ et $V_{\text{min}} = 0$.

5.3.2 Tension pour la méthode B

La méthode B utilise $\pm (1\,000 \pm 5) \text{ V}$ en courant continu pour le mesurage de tous les films. La tension varie alternativement d'une polarité positive à une polarité négative. Dans le cas présent, $V_{\text{max}} = +V = + (1\,000 \pm 5) \text{ V}$ et $V_{\text{min}} = -V = - (1\,000 \pm 5) \text{ V}$.

5.4 Cycle de mesure

5.4.1 Cycle pour la méthode A

Pour la méthode A, utiliser une durée de cycle de 1 h. Le cycle de 1 h est destiné au renseignement des fiches techniques. Le mesurage comprend un cycle 'sous tension' d'une durée de 1 h à la tension d'essai (V_{max}) de 1 000 V, suivi d'un cycle "hors tension" d'une durée de 1 h à une tension de 0 V, puis est répété. Pour des échantillons plus épais, la tension est réglée de sorte que le champ électrique soit de 2 000 V/mm.

5.4.2 Cycle pour la méthode B

Pour la méthode B, utiliser une durée de cycle de 1 min. Le cycle de 1 min est destiné au contrôle de la qualité ou au contrôle de procédé. Dans le cas présent, la tension varie entre $+ (1\,000 \pm 5) \text{ V}$ et $- (1\,000 \pm 5) \text{ V}$.

5.5 Résultats

Les mesurages du courant sont enregistrés à la fin des cycles. Le courant mesuré à la fin du premier cycle (I_1) est rejeté, mais les quatre mesurages suivants (I_2 , I_3 , I_4 , I_5) sont enregistrés. Afin de réduire le plus possible les effets des courants de fond, une moyenne pondérée (I_{Moy}) pour le courant est calculée comme suit [3];

$$I_{Moy} = \frac{[-I_2 + 3I_3 - 3I_4 + I_5]}{8} \quad (1)$$

NOTE 1 Étant donné que les modules photovoltaïques sont exposés pendant de longues périodes à des tensions élevées, suivies de longues périodes (nocturnes) sans tension, une méthode de mesure sous tension/hors tension est appliquée pour produire des valeurs qui représentent l'utilisation d'application.

Dans le cas présent, I_2 , I_3 , I_4 et I_5 , représentent les mesurages séquentiels du courant dans les conditions sous tension et hors tension pour la méthode A et dans les conditions sous tension à polarité alternative pour la méthode B. La résistivité transversale (ρ) est déterminée à partir de la formule:

$$\rho = \frac{(V_{max} - V_{min})A}{2I_{Moy} \cdot t} \quad (2)$$

Pour la méthode A, V_{max} représente l'application de la condition sous tension et V_{min} représente l'application de la condition hors tension (0 V dans ce cas). Pour la méthode B, V_{max} est une tension positive et V_{min} est une tension négative. Dans le cas présent, t est l'épaisseur de l'éprouvette et A est la surface effective de l'électrode la plus petite donnée par,

$$A = \pi \frac{(d_1 + g)^2}{4} \quad (3)$$

où g est l'espace pour l'électrode de garde et d_1 est le diamètre de l'électrode d'essai, Figure 1.

En raison du rejet du premier cycle, il convient que la durée de ce mesurage soit de 5 h dans le cas de la méthode A ou de 5 min dans le cas de la méthode B. En cas de doute concernant le fonctionnement d'un instrument, utiliser la méthode B, en notant le temps d'essai total, afin de vérifier ce fonctionnement.

NOTE 2 Cette technique de calcul d'une moyenne des mesurages permet d'éliminer un courant de fond à variation constante et est souvent appliquée de manière automatique dans les électromètres du commerce. La méthode B constitue généralement un protocole normalisé pour les électromètres. La méthode A peut être mise en œuvre par un réglage de l'électromètre pour des mesures en mode à polarité alternative avec une tension alternative de 500 V et un décalage en courant continu de 500 V afin de produire un modèle de mesure "sous tension/hors tension" de 1 000 V/0 V. De nombreux instruments du commerce rejettent automatiquement le premier mesurage.

NOTE 3 Les électromètres utilisent également couramment la formule (1) pour calculer un courant moyen. Lorsque les électromètres types utilisent la méthode à polarité alternative, le calcul de la résistivité transversale repose sur la tension obtenue par la méthode à polarité alternative. Les électromètres types ne prennent pas en considération la tension de décalage dans le calcul de la résistivité transversale, et la formule de calcul ne comporte pas le facteur de 1/2 comme celui utilisé dans la formule (2). Dans la mesure où V_{max} correspond au double de la valeur de la tension à polarité alternative programmée dans l'électromètre pour produire les valeurs «sous tension/hors tension», ces facteurs s'annulent et les électromètres types calculent des valeurs équivalentes à la formule (2).

Lorsque le courant mesuré est inférieur à 2 nA, il peut être nécessaire de désactiver la fonction de commutation automatique de calibre de l'électromètre afin d'obtenir des mesurages valides.

Si au cours des mesurages, une valeur de courant négative est obtenue, sauf lorsque $V = 0$ et quel que soit le cycle, même pour la plage d'intensité de courant d'instrument la plus sensible, l'éprouvette ne peut alors pas être mesurée avec la configuration de l'instrument. Dans ce cas, il convient de déterminer séparément les limites de l'instrument et de consigner dans le rapport d'essai la résistivité comme étant simplement supérieure à la capacité de mesure de l'instrument. Cette résolution d'instrument pour un instrument et un montage d'essai bien protégés est déterminée en utilisant la valeur de la plage d'intensité de courant la plus faible et la géométrie de l'échantillon dans les formules (1), (2) et (3). Pour déterminer la plage d'intensité de courant la plus faible, il convient de s'assurer que le bruit d'environnement ne limite pas, en pratique, le montage de l'instrument à des plages d'intensité de courant plus élevées.

Tous les mesurages (indiqués sous la forme de 2 chiffres significatifs) sont pris comme la moyenne ρ , en $\Omega \cdot \text{cm}$, de 5 échantillons, avec l'écart-type des mesurages. Les résultats supérieurs ou égaux à $1 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ doivent être indiqués comme étant supérieurs à $1 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$.

6 Rapport d'essai

Un rapport certifié des essais, avec les caractéristiques de performances mesurées, doit être établi par le laboratoire d'essai conformément à l'ISO/IEC 17025. Le rapport doit comprendre la spécification particulière pour le matériau. Chaque certificat ou rapport d'essai doit comprendre au moins les informations suivantes:

- a) un titre;
- b) le nom et l'adresse du laboratoire d'essai, ainsi que le site de réalisation des essais;
- c) l'identification unique du certificat ou du rapport, ainsi que de chaque page;
- d) le nom et l'adresse du client, le cas échéant;
- e) la description et l'identification de l'élément soumis à l'essai, y compris l'épaisseur des éprouvettes;
- f) la caractérisation et l'état de l'élément d'essai; y compris la méthode et les détails de préparation des éprouvettes (y compris le durcissement, la stratification ou un traitement similaire, s'il y a lieu), la température de mesure et de préconditionnement et l'humidité relative;
- g) la date de réception de l'élément d'essai, ainsi que la ou les dates d'essai, le cas échéant;
- h) l'identification de la méthode d'essai utilisée (méthode A ou B);
- i) la référence à la procédure d'échantillonnage, le cas échéant;
- j) les écarts, ajouts ou exclusions éventuels par rapport à la méthode d'essai, ainsi que toutes les autres informations relatives à un essai spécifique, telles que les conditions ambiantes ou la tension;
- k) les mesurages, examens et résultats dérivés étayés par des tableaux, graphiques, croquis et photographies suivant le cas, y compris la résistivité mesurée à la fois pour les éprouvettes conditionnées à l'état mouillé avec une HR de 50 % et les éprouvettes conditionnées à l'état sec, à la température ambiante et aux autres températures éventuelles mesurées. Consigner la moyenne et l'écart-type dans le rapport d'essai;
- l) pour les éprouvettes composées de plusieurs couches, indiquer que la résistivité mesurée est une résistivité volumique efficace;
- m) un énoncé de l'incertitude estimée des résultats d'essai (le cas échéant);
- n) la signature et la fonction, ou une identification équivalente de la ou des personnes assumant la responsabilité du contenu du certificat ou du rapport, ainsi que la date d'émission;
- o) le cas échéant, un énoncé stipulant que les résultats se rapportent aux seuls éléments soumis à l'essai;

- p) un énoncé stipulant que le certificat ou le rapport ne doit pas être reproduit, si ce n'est dans son intégralité, sans le consentement écrit du laboratoire.

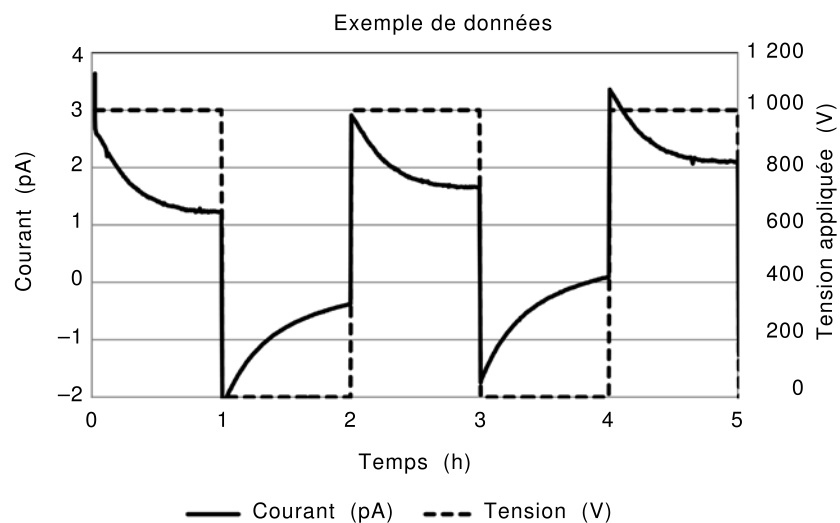
Annexe A (informative)

Études menées sur la résistivité transversale des matériaux d'encapsulation

Il est admis que la dégradation des modules photovoltaïques soit due en partie à une corrosion électrochimique, qui dépend de la résistivité de l'encapsulation utilisée. L'encapsulation doit également limiter le flux ionique (par exemple, à l'état humide) afin d'empêcher toute dégradation induite par un potentiel ou une polarisation électrique. Les données historiques relatives à la résistivité transversale des matériaux d'encapsulation photovoltaïques peuvent être consultées dans les références [1] et [2] de la bibliographie. Concernant les applications photovoltaïques, il est souvent constaté que l'augmentation de la résistivité des encapsulants de $10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$ à environ $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$ peut résoudre de manière significative les problèmes liés à une dégradation induite par des potentiels. Toutefois, des résistivités plus élevées n'engendrent que des améliorations mineures, voire négligeables [4].

Annexe B (informative)

Exemple de données



IEC

Figure B.1 – Exemple de données indiquant le courant et la tension en fonction du temps pour la méthode A de mesure

Tableau B.1 – Mesurages et valeurs du courant de fin de cycle utilisés pour le calcul de la résistivité transversale conformément à la méthode A

Courants mesurés et données calculées		
$I_1 =$	1,2	(pA)
$I_2 =$	-0,38	(pA)
$I_3 =$	1,7	(pA)
$I_4 =$	0,0093	(pA)
$I_5 =$	2,1	(pA)
$I_{\text{moy}} =$	0,89	(pA)
$2 \cdot I_{\text{moy}} =$	1,8	(pA)
$t =$	0,46	(mm)
$V_{\text{max}} =$	1 000	(V)
$A =$	20,5	(cm ²)
$\rho =$	$2,5 \times 10^{17}$	($\Omega \cdot \text{cm}$)

Bibliographie

- [1] G. R. Mon and R. G. Ross, "Electrochemical degradation of amorphous-silicon photovoltaic modules," in *Proceedings of the 18th IEEE PV Specialists Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, 1985, pp. 1142-1149
 - [2] G. Mon, L. Wen, J. Meyer, R. Ross, Jr., and A. Nelson, "Electrochemical and galvanic corrosion effects in thin-film photovoltaic modules", in *Photovoltaic Specialists Conference, 1988, Conference Record of the Twentieth IEEE*, 1988, pp. 108-113 vol.1
 - [3] Adam Daire, "Improving the Repeatability of Ultra-High Resistance and Resistivity Measurements", *White paper by Keithley Instruments*, 2001
 - [4] C. Reid, S. Ferrigan, I. Fidalgo, and J. T. Woods, "Contribution of PV Encapsulant Composition to Reduction of Potential Induced Degradation of Crystalline Silicon PV Cells," *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2013
 - [5] Keithley, *Low Level Measurements Handbook: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements*, 7th Edition, 2013, 1-245
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch