

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Photovoltaic concentrators (CPV) – Performance testing –
Part 3: Performance measurements and power rating**

**Concentrateurs photovoltaïques (CPV) – Essai de performances –
Partie 3: Mesurages de performances et rapport de puissance**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 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 16 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 16 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



**Photovoltaic concentrators (CPV) – Performance testing –
Part 3: Performance measurements and power rating**

**Concentrateurs photovoltaïques (CPV) – Essai de performances –
Partie 3: Mesurages de performances et rapport de puissance**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-3859-2

**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
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Concepts	7
4 Sampling	11
5 DUT marking and information	11
5.1 Indelible marking	11
5.2 Preliminary information indicated by manufacturer	11
6 Testing	11
7 Report	12
8 Standard apparatus requirements	13
8.1 Irradiance measurement equipment	13
8.1.1 Normal incidence pyrheliometer (NIP).....	13
8.1.2 Global normal irradiance pyranometer	13
8.1.3 Spectral measurement device.....	13
8.1.4 Component reference cells	14
8.1.5 Indoor reference irradiance sensor	14
8.1.6 Auxiliary irradiance sensor.....	15
8.2 Solar simulator.....	15
8.2.1 General requirements	15
8.2.2 Continuous light simulator	15
8.2.3 Single-flash pulse simulator.....	16
8.2.4 Multi-flash pulse simulator.....	16
8.3 Solar tracker or DUT mounting system.....	16
8.3.1 General	16
8.3.2 Pointing error sensor	16
8.4 Temperature measurement and control.....	16
8.4.1 DUT temperature sensor.....	16
8.4.2 Ambient temperature sensor	16
8.4.3 Lens or optics temperature sensor	16
8.4.4 Temperature control system	17
8.5 Current-voltage measurement.....	17
8.6 Anemometer	17
8.7 Electrical load	17
9 Test procedures	18
9.1 Measurement of DUT temperature coefficients.....	18
9.1.1 Purpose.....	18
9.1.2 Apparatus.....	18
9.1.3 Data collection procedure and data requirements	18
9.1.4 Temperature coefficient determination.....	21
9.2 DUT reference V_{OC} at (900 W/m^2 and $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ cell temperature).....	22
9.2.1 General	22
9.2.2 Reference V_{OC} dark I-V procedure	22
9.2.3 Reference V_{OC} using a solar simulator	23
9.3 Calculating the average DUT cell temperature	23
9.3.1 Purpose.....	23

9.3.2	Procedure.....	24
9.4	Reference irradiance sensor calibration and reference I_{SC} determination	24
9.4.1	Purpose	24
9.4.2	Data requirements	24
9.4.3	Determination of the calibrated and reference I_{SC} , ($I_{SC, cal}$ and I_{SCR}).....	24
9.4.4	Calibration requirement	26
9.5	Indoor I-V measurements of a CPV DUT	26
9.5.1	Purpose	26
9.5.2	General measurement requirements	26
9.5.3	DUT indoor alignment procedure	28
9.5.4	Procedure for single-flash pulsed solar simulators	28
9.5.5	Procedure for multi-flash pulsed solar simulators.....	28
9.6	Outdoor I-V measurements of a CPV DUT	28
9.6.1	Purpose	28
9.6.2	Apparatus	28
9.6.3	Procedure.....	29
9.6.4	Report	29
9.7	CSOC and CSTC power ratings	30
9.7.1	Data filtering requirements for CSOC or CSTC translation	30
9.7.2	CSOC power determination	31
9.7.3	CSTC power determination	31
9.8	DUT alignment procedure and measurement of misalignment sensitivity	32
9.8.1	Purpose	32
9.8.2	Apparatus	32
9.8.3	Recommendations for initial DUT mounting	33
9.8.4	General requirements	33
9.8.5	Individual off-axis sweeps and final DUT alignment	33
9.8.6	Alternate ellipse plot procedure for reporting misalignment sensitivity.....	34
9.8.7	Reporting.....	34
9.9	Mounting and aligning the pointing error sensor and other alignment sensitive equipment	35
9.9.1	Purpose	35
9.9.2	Procedure.....	35
9.10	Outdoor lens temperature performance test	35
9.10.1	General guidance	35
9.10.2	Procedure.....	36
9.10.3	Reporting.....	37
9.11	Indoor lens temperature performance test.....	38
9.11.1	General guidance	38
9.11.2	Procedure.....	38
9.11.3	Reporting.....	39
	Bibliography.....	40
	Figure 1 – Collimating tube geometry.....	9
	Figure 2 – Solar tracker pointing error.....	10
	Figure 3 – Example of acceptance angle data for a CPV DUT	10
	Figure 4 – Flow chart of performance testing for the DUT	12
	Figure 5 – V_{OC} data after an uncover event.....	20

Figure 6 – Figure 5 repeated after removing one data point	21
Figure 7 – The derivative of dark I-V data plotted to determine R_s	23
Figure 8 – Iterative approach to determine I_{SC} and V_{OC}	26
Figure 9 – Raw data for extracting the impact of lens temperature	37
Figure 10 – Filtered data for extracting impact of lens temperature	37
Table 1 – SMR requirements for indoor measurements	27

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**PHOTOVOLTAIC CONCENTRATORS (CPV) –
PERFORMANCE TESTING –****Part 3: Performance measurements and power rating****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 62670-3 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
82/1204/FDIS	82/1233/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 62670 series, published under the general title *Photovoltaic concentrators (CPV) – Performance testing*, can be found on the IEC website.

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

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

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

PHOTOVOLTAIC CONCENTRATORS (CPV) – PERFORMANCE TESTING –

Part 3: Performance measurements and power rating

1 Scope

This part of IEC 62670 defines measurement procedures and instrumentation for determining concentrator photovoltaic performance at concentrator standard operating conditions (CSOC) and concentrator standard test conditions (CSTC), defined in IEC 62670-1, including power ratings.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60891, *Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices*

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-4:2009, *Photovoltaic devices – Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability*

IEC 60904-10, *Photovoltaic devices – Part 10 Methods of linearity measurement*

IEC 62670-1, *Photovoltaic concentrators (CPV) – Performance testing – Part 1: Standard conditions*

IEC 62817:2014, *Photovoltaic systems – Design qualification of solar trackers*

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

ISO 2859-1, *Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection*

ISO 9060:1990, *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*

3 Concepts

The following concepts are used through this document.

- a) CSOC – concentrator standard operating conditions per IEC 62670-1 (direct normal irradiance (DNI) 900 W/m², 20 °C ambient temperature, 2 m/s wind speed, AM1.5D spectrum per IEC 60904-3).
- b) CSTC – concentrator standard test conditions per IEC 62670-1 (DNI 1 000 W/m², 25 °C cell temperature, AM1.5D spectrum per IEC 60904-3).

- c) SMR – spectral matching ratio, $SMR(i,j) = \frac{I_i/I_j}{I_{i,ref}/I_{j,ref}}$ where I_i and I_j are the short-circuit

current or short-circuit current densities under prevailing spectral conditions per the i and j distinct subcells in the multi-junction solar cell. $I_{i,ref}$ and $I_{j,ref}$ are the associated short-circuit currents/current densities under the AM 1.5 direct spectrum as defined by IEC 60904-3. The subcell is assigned a number in the ordering of their band gap energy (E_g) starting with 1 for the highest E_g and up to n for the lowest E_g . In this manner a multi-junction solar cell with n distinct sub cells has $(n^2-n)/2$ unique SMR values. For example, for $n = 3$ (three-junction device) there is SMR(1,2), SMR(1,3) and SMR(2,3). For a lattice matched triple junction cell: GaInP is junction 1, GaInAs is junction 2, and Ge is junction 3.

SMR as applied to outdoor I-V curves does NOT imply that the outputs from subcells will match the DUT but to a more generic set of subcells used by the test laboratory to characterize deviations in the prevailing outdoor spectrum from the reference AM1.5D spectrum. A specific DUT match is not required as precipitable water vapor, aerosols, and airmass are the dominant variables which drive changes in the outdoor spectrum. It has been shown that filtering based on measurements in three sub-bands of the spectrum is sufficient to minimize CPV DUT performance variation. Component reference cells (8.1.4) can be used to determine SMR values or the SMR can be calculated under the prevailing spectrum. In this case I_1 , I_2 and I_3 are generally defined as the direct normal spectral irradiance in sub-bands from 370 nm to 650 nm, 650 nm to 870 nm and 870 nm to 1 650 nm respectively. This is equivalent to assuming a set of component reference cells which have external quantum efficiencies (EQE) of 100 % in the defined bands.

SMR as applied to indoor I-V curves DOES refer to outputs from the subcells that match the DUT. The indoor measurements specifically refer to matching subcells as the spectrum under simulated sunlight is known to deviate from the characteristic shape of the outdoor spectrum. Therefore three sub-bands are not always sufficient to minimize variation in CPV DUT performance. SMR can be determined from device specific component reference cells or can be calculated from the measured spectrum and the spectral responses of device specific component reference cells.

- d) Separate SMR crossing – event in outdoor data measurements where the given SMR value is within the defined boundaries around unity and the event is separated by at least an hour from other events where the SMR value is within the defined boundaries around unity.
- e) MPP – global maximum power point of an I-V curve.
- f) V_{mp} – the voltage at MPP.
- g) I_{mp} – the current at MPP.
- h) DNI– direct normal irradiance.
- i) GNI– global normal irradiance.
- j) η – efficiency of the DUT at MPP for an individual I-V curve.
- k) DUT – device under test.
- l) Aperture – aperture area of the DUT, measured from inside edge to inside edge of the DUT frame. If no clear transition from lens to frame is present an opaque tape can be used to mask off the edge of lens area and define the edge of the aperture area. This shall be completed prior to the collection of I-V curves. If this method is not applicable to the DUT, alternate methods can be considered. The test report shall document the procedure used for determining aperture area.
- m) Opening half-angle – half-angle of a device with a collimating tube defined as the $\arctan(R/L)$ per Figure 1.
- n) Field of view or opening full-angle– two times the opening half angle.

- o) Slope angle – angle of a device with a collimating tube defined as the $\arctan[(R-r)/L]$ per Figure 1.
- p) Limit angle – angle of a device with a collimating tube defined as the $\arctan[(R+r)/L]$ per Figure 1.
- q) Primary and secondary axis pointing error – measured angle between the pointing vector of the tracker and the pointing vector of the sun (see Figure 2) [adapted from IEC 62817:2014, 7.2]. Typically the pointing vector of the tracker is defined by the sensor that is used for measuring pointing error. The sensor has a plane which is responsive to the direct beam from the sun. Therefore the normal vector to this measurement plane is representative of the pointing vector of the tracker or the pointing vector of the DUT. Although pointing error as defined is a single angular deviation, the sensor measures this error in two separate angles in relation to reference plane

$$\text{pointing error} = \sqrt{\text{primary axis pointing error}^2 + \text{secondary axis pointing error}^2}$$

In this document, primary and secondary axis pointing error are defined by the above equation. As it is also assumed that the plane of the DUT is aligned with the pointing error sensor, the primary and secondary axes are also representative for the DUT.

- r) Acceptance angle – minimum full angle through which the DUT can be rotated (with respect to the sun) while continuing to produce 90 % of its DNI normalized maximum power. Although a two dimensional plot is necessary to fully determine acceptance angle, herein acceptance angle refers to the minimum full angle as resulting from angular measurement sweeps limited to the primary and secondary axes of the DUT (see 9.8.5). For example the DUT described in Figure 3. Figure 3 shows acceptance angle measurement results of $0,75^\circ$ for the primary axis and $0,7^\circ$ for the secondary axis. Therefore the acceptance angle for this DUT is reported as $0,7^\circ$. Caution should be noted that Figure 3 shows measurement results that are symmetric around the zero point (normal angle of incidence) but a DUT can have asymmetric results.
- s) Half acceptance angle – half acceptance angle is defined as the acceptance angle defined above divided by two. This definition is introduced as it is more relevant to filtering restrictions placed on pointing error later in this document. Although asymmetry around the zero angle of incidence is not consistent with this definition of half angle, the definition is retained for simplicity.
- t) 98 % acceptance angle and 98 % half acceptance angle – the definitions acceptance angle and half acceptance angle given above apply with the exception that when preceded by 98 % the terms now refer to full and half angles through which DUT orientation can be rotated while continuing to produce 98 % of its DNI normalized maximum power (not the original 90 %). For example the DUT in Figure 3 shows a 98 % acceptance angle of $0,32^\circ$ and a 98 % half angle measurement of $0,16^\circ$.

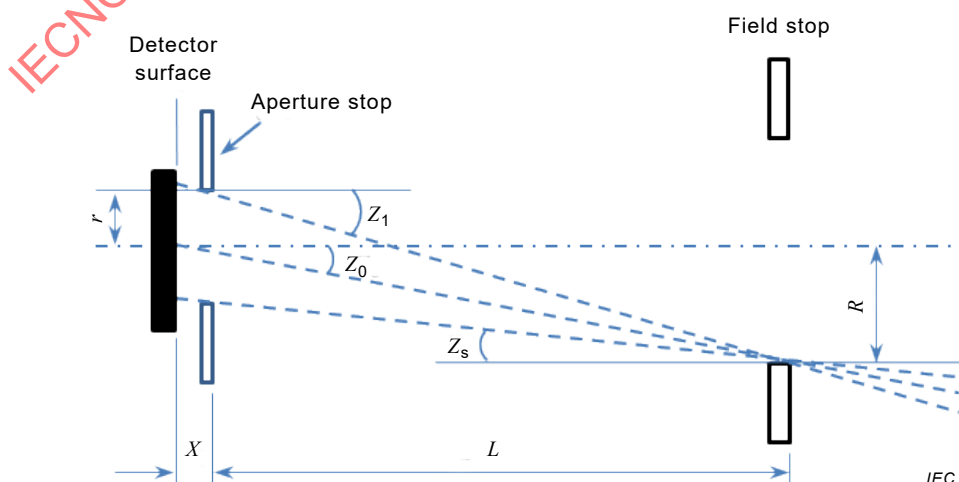


Figure 1 – Collimating tube geometry

In Figure 1 the field stop represents the limiting entry point for light into the collimating tube and has a radius of R . The aperture stop represents further limitation of the light which can reach the detector and has a radius of r . L is the distance between the front of the field stop and aperture stop. It is assumed that the distance, X , between the aperture stop and the detector is small and negligible.

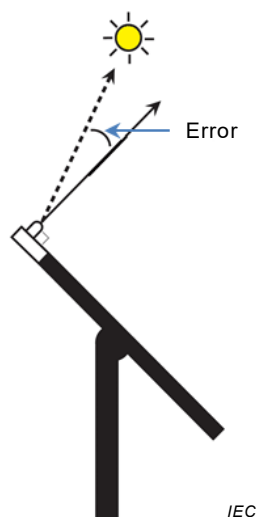


Figure 2 – Solar tracker pointing error

IEC 62817 defines pointing error of a solar tracker as the measured angle between the pointing vector of the tracker and the vector of the sun's rays. As shown here the pointing vector of the tracker is the vector which is normal to the plane of sensor that measures pointing error.

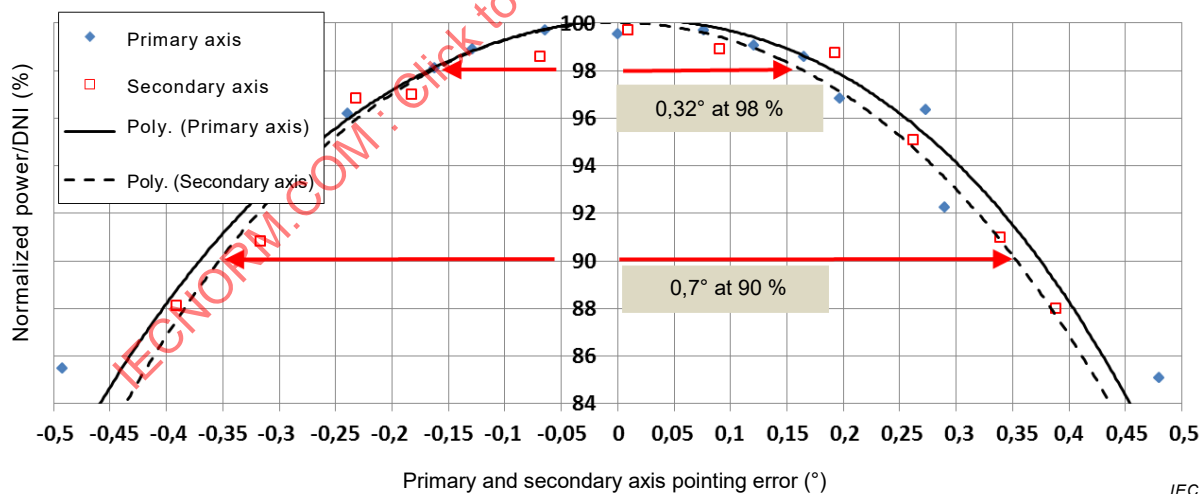


Figure 3 – Example of acceptance angle data for a CPV DUT

In Figure 3 the secondary axis acceptance angle is slightly less than the primary axis acceptance angle and therefore the secondary axis is used in reporting. The DUT has an acceptance angle of $0,7^\circ$ (half acceptance angle of $0,35^\circ$) and a 98 % acceptance angle of $0,32^\circ$ (98 % half acceptance angle of $0,16^\circ$).

4 Sampling

For performance qualification testing three specimens shall be selected at random from a production batch or batches in accordance with the procedure given in ISO 2859-1. For measurements of prototype devices which are not from production, sampling shall not apply. This shall be noted in the test report.

When the results will be used for ascribing a name-plate rating, the modules or assemblies, hereafter referred to as device under test (DUT), shall have been manufactured from specified materials and components in accordance with the relevant drawings and process sheets and shall have been subjected to the manufacturer's normal inspection, quality control and production acceptance procedures. The DUT shall be complete in every detail and shall be accompanied by the manufacturer's handling and final assembly instructions regarding the recommended installation of any diodes, frames, brackets, etc.

5 DUT marking and information

5.1 Indelible marking

Each DUT shall carry the following clear and indelible markings:

- name, monogram or symbol of the manufacturer;
- type or model number;
- serial number;
- polarity of terminals or leads (colour coding is permissible);
- the date and place of manufacture shall be marked on the DUT or be traceable from the serial number.

5.2 Preliminary information indicated by manufacturer

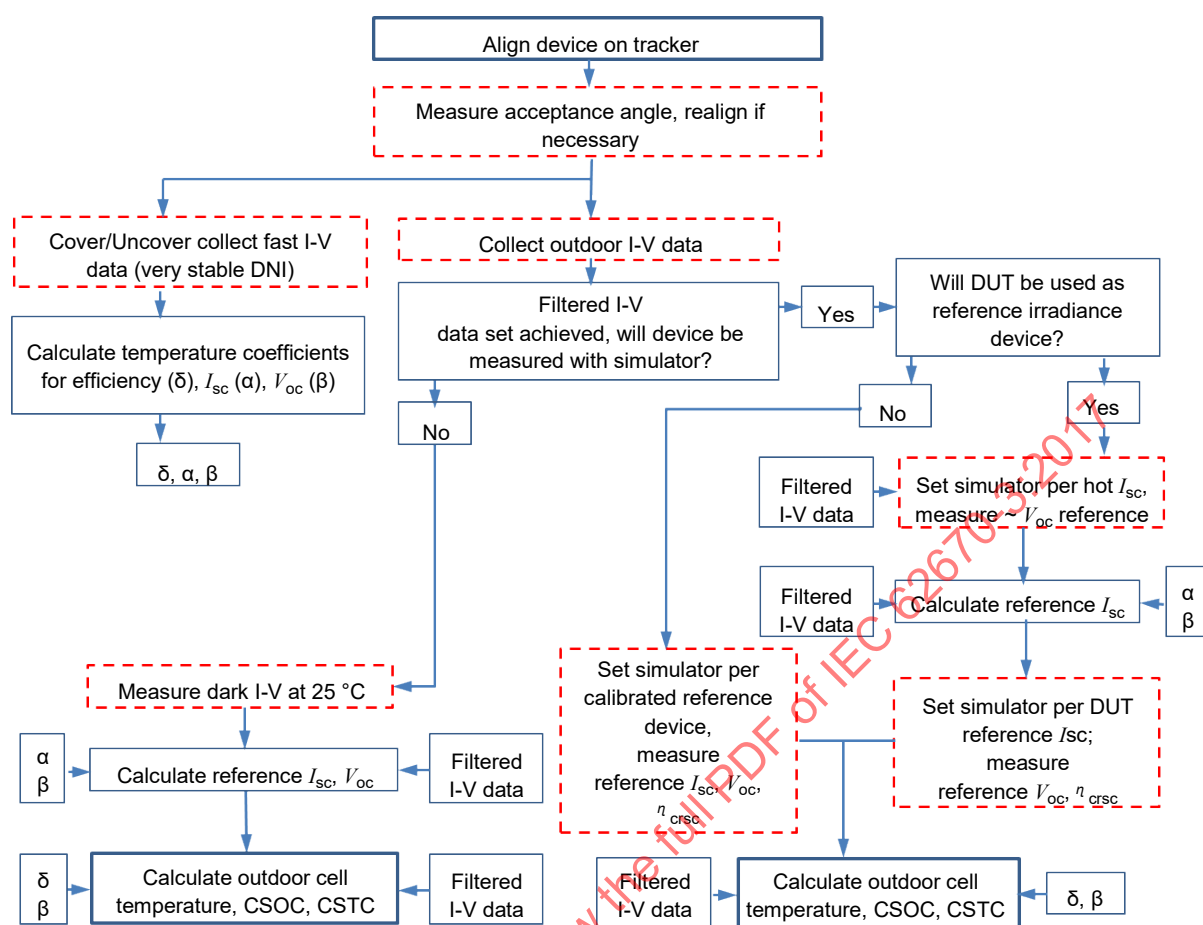
Indicative values shall be provided by the manufacturer to the test laboratory for the purpose of measurement setup:

- expected maximum power point (MPP), V_{OC} , and I_{SC} at CSOC;
- acceptance angle;
- installation instructions.

6 Testing

The DUT shall be subjected to the procedure for irradiance and temperature performance measurements defined in Clause 9. In carrying out the tests, where applicable the tester shall observe the manufacturer's handling, mounting and connection instructions.

Testing of the DUT shall follow the test sequence as defined in Figure 4.



IEC

NOTE The dashed boxes indicate actual measurements while solid boxes indicate calculations or decisions in the flow chart.

Figure 4 – Flow chart of performance testing for the DUT

7 Report

Following completion of the procedure, a certified report of the performance tests, with measured power characteristics shall be prepared by the test agency in accordance with the procedures of ISO IEC 17025. Each certificate or test report shall include at least the following information.

- a title;
- name and address of the test laboratory and location (including latitude, longitude and altitude if outdoor measurements were included) where the calibration or tests were carried out;
- unique identification of the certification or report and of each page;
- name and address of client, where appropriate;
- description and identification of the item calibrated or tested;
- characterization and condition of the calibration or test item;
- date of receipt of test item, date(s) of calibration, and dates and time of outdoor testing, where appropriate;
- identification of calibration or test method used;
- reference to sampling procedure, where relevant;

- j) any deviations from, additions to or exclusions from the calibration or test method, and any other information relevant to a specific calibration or test, such as environmental conditions;
- k) measurements, examinations and derived results, include the following as a minimum: a histogram of all CSOC data points and the mean CSOC power, the mean power at CSTC (include a histogram of all translated data points if outdoor data is used to determine CSTC), DUT temperature coefficients, and the reference V_{oc} and I_{sc} used for cell temperature calculations;
- l) a statement of the estimated uncertainty of test results;
- m) a statement as to whether the measured CSOC powers agree with the manufacturer's indicated values within the test laboratory's measurement uncertainty (if appropriate);
- 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 calibrated or tested;
- p) a statement that the certificate or report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory;
- q) identification of the tracker used, the tracker pointing error sensor including sensor calibration data and date, and the documented tracker accuracy characterization per IEC 62817:2014, Clause 7;
- r) identification of the wind sensor used, the location of the wind sensor and the calibration of the wind sensor;
- s) identification of the normal incidence pyrheliometer (NIP) used and the calibration of the pyrheliometer;
- t) identification of the current and voltage sensors used and their calibration;
- u) identification of the alignment method used for the DUT;
- v) identification of distance between NIP and DUT;
- w) identification of the component reference cells or spectroradiometer used and the calibration;
- x) identification of the cleaning dates for the DUT, the NIP, and the component reference cells if applicable;
- y) statement of determination of aperture area.

A copy of this report shall be kept by the manufacturer for reference purposes.

8 Standard apparatus requirements

8.1 Irradiance measurement equipment

8.1.1 Normal incidence pyrheliometer (NIP)

The DNI measurements shall be made using a first class normal incidence pyrheliometer in accordance with ISO 9060:1990. The reference device shall be linear in measurement as defined in IEC 60904-10 over the irradiance range of interest.

8.1.2 Global normal irradiance pyranometer

GNI measurements shall be made using a PV reference device packaged and calibrated in conformance with IEC 60904-2 or a pyranometer.

8.1.3 Spectral measurement device

For outdoor measurements, the spectral measurement device shall be capable of determining the direct normal spectral irradiance at least in the 3 distinct ranges of wavelengths necessary

for determining SMR values as defined by item c) of Clause 3. For simulator measurements, the spectral measurement device shall be capable of determining direct normal spectral irradiance in the separate ranges of wavelengths which correspond to subcells in the DUT. The device shall include collimating tubes such that the opening full-angle is 5° and the slope angle is 1° . The device shall be calibrated as a primary or secondary reference device and show traceability per 3.3, 3.4 and 3.5 of IEC 60904-4:2009 respectively. Calibration shall be completed at least once per year. The spectral measurement device could be a spectroradiometer, component reference cells as defined by 8.1.4, or another suitable instrument. The uncertainty of the SMR values that are generated shall be documented. For indoor measurements, the designated test area of the solar simulator's beam shall include also the aperture area of this spectral measurement device.

8.1.4 Component reference cells

8.1.4.1 General

Component reference cells are a set of devices that together can serve as the spectral measurement device for this document. A minimum of 3 separate cells/junctions are required for outdoor spectral irradiance measurements.

8.1.4.2 Standard component reference cells

Standard component reference cells are a set of component reference cells that are an acceptable outdoor spectral measurement device regardless of the DUT. The standard set of component reference cells shall be equivalent to the individual junctions from a latticed matched triple junction cell with bandgaps of 1,9 eV, 1,4 eV, and 0,7 eV. It is expected that component cells from a conventional triple junction latticed matched GaInP/GaInAs/Ge cell will meet these requirements.

NOTE This standard set of component reference cells is not intended to be a specific match to the subcells in the DUT or to the current generated from each of the DUT subcells. While not specific to the DUT, the standard component reference cells enable filtering of outdoor data which limit spectral variation and minimize uncertainty in performance reported at CSOC and CSTC (derived from outdoor I-V data).

8.1.4.3 DUT matched component reference cells

Component reference cells that are specifically matched to the DUT can provide improved information about the current matching of the subcells in the DUT and are applicable as a spectral measurement device both indoors and outdoors. With sufficient test data, specifically matched component reference cells can lead to SMR filtering criteria that reduce uncertainty of ratings at CSOC and CSTC. The test laboratory is permitted to use DUT matched component reference cells if the following are true:

- a) the component cells meet all requirements of 8.1.3;
- b) the component cells are of the same design, materials and manufacturer as the subcells in the DUT.

8.1.5 Indoor reference irradiance sensor

The indoor reference irradiance sensor is a sensor used for calibrating the irradiance output from the solar simulator for the DUT. The indoor reference irradiance sensor serves as a secondary reference instrument per calibration against a primary reference instrument (NIP). The indoor reference irradiance sensor shall be linear and stable as defined in IEC 60904-10 over the irradiance range of interest. (Calibration is described in 9.4). The solar simulator is adjusted such that the indoor reference irradiance sensor produces its calibrated $I_{sc,cal}$ when illuminated. The indoor reference irradiance device shall have a construction that is nearly identical to the DUT. To be nearly identical it shall meet the following criteria:

- a) the individual optical train between external collimated light and the cell (primary and secondary if applicable) shall be of the same design, materials, focal length, and size, and manufacturer;

- b) the cell or cells used shall be of the same design, materials, size, and from the same manufacturer,

In other words the indoor reference irradiance sensor shall be a representative match to the DUT but it can have fewer optical/cell pairs resulting in a fraction of the full device aperture area. The smallest device shall have at least one optical/cell pair, hereafter called a “mono-module”.

The above criteria are to ensure the sensor has nearly identical responsivity, measured per I_{sc} , to irradiance, to angular alignment, and to spectrum as the DUT. If for any reason the reference irradiance sensor has suspected deviation in response compared to the DUT, an alternate reference irradiance sensor should be chosen. If there are strong misalignments between the performances of the cells within the DUT, the angular response of a mono-module may differ from that of the DUT. In this case the DUT should also serve as the reference irradiance sensor. This point shall be examined for every technology and may change as a manufacturer changes factory controls for alignment.

NOTE 1 If only one specimen is available for a given technology, then the test specimen itself can be used as the indoor reference irradiance sensor.

NOTE 2 For sensors which contain series connected cells, non-uniform illumination can cause an overestimation of the ISC and thus an underestimation of the irradiance.

8.1.6 Auxiliary irradiance sensor

An auxiliary irradiance sensor is a PV device for which the I_{sc} response has been calibrated against the I_{sc} response of the indoor reference irradiance sensor over the range of interest. This sensor can be used for monitoring instantaneous changes in irradiance during the simulator flash. If this sensor does not include concentrating optics, the sensor shall include a collimating tube which has an opening full-angle of 5° and a slope angle of 1°. The auxiliary irradiance sensor shall be linear and stable as defined in IEC 60904-10 over the irradiance range of interest.

8.2 Solar simulator

8.2.1 General requirements

Methods for classifying collimated light solar simulators as necessary for determining if a particular simulator is appropriate for use with a particular CPV DUT may be specified in IEC 60904-9-11. The simulator used should be documented in the test report along with its classification per IEC 60904-9-12.

8.2.2 Continuous light simulator

A continuous light solar simulator has a light source which is in the on or in the steady-state illuminated state for sufficient time such that the device under test can be exposed and measured under this steady-state light. It has been shown that CPV cells within a module and under continuous high concentration light for more than 10 ms can heat multiple degrees Celsius and therefore this type of simulator is often not appropriate for use with CPV devices. As heating rate can depend on DUT design it is possible that even a few milliseconds of continuous light could have significant influence. Note that if the simulator light source is on continuously but that the simulator has an aperture window which prevents continuous illumination of the DUT, such heating problems can be avoided.

1 Under consideration.

2 Under consideration.

8.2.3 Single-flash pulse simulator

A single-flash pulse simulator is a simulator which uses a measurement system that can measure the entire I-V curve for the DUT in a single flash pulse of the simulator light source. The measurement duration shall be short enough that no more than 2 °C heating occurs to the cell(s) in the DUT. Verification is completed by performing an I-V curve sweep in both directions. The hysteresis between the two I-V curves shall be used to determine that no more than 2 °C heating has occurred. Heating shall be measured as the hysteresis voltage divided by β (see 9.1.4 for determination of β).

8.2.4 Multi-flash pulse simulator

A multi-flash pulse simulator is defined as a simulator using a measurement system that only records one or a limited range of current-voltage points for every flash pulse of the light source. The entire I-V curve for the DUT is completed through multiple flashes and multiple measurements.

8.3 Solar tracker or DUT mounting system

8.3.1 General

A solar tracker is required for pointing the DUT and other alignment sensitive equipment toward the incident sunlight and shall be consistent with definitions per IEC 62817. Indoors, the DUT mounting system is the equipment used to mount the DUT and align it with the incident light from the solar simulator. Both the tracker and the DUT mounting system shall be able to maintain alignment of the DUT to the incident light as specified in the corresponding test procedure. In the case of a CPV DUT designed for single-axis tracking, a 2-axis tracker should be used in order to avoid the rating becoming dependent on the time of year.

8.3.2 Pointing error sensor

The pointing error sensor measures the angular deviation between the normal vector of the sensor and the vector of the sun's direct beam (see Figure 2). The pointing error can be broken down into components of primary and secondary axis pointing error. The device shall be consistent with IEC 62817:2014, Clause 7.

8.4 Temperature measurement and control

8.4.1 DUT temperature sensor

Equipment for monitoring the temperature of the DUT shall have an accuracy of ± 1 °C and repeatability of $\pm 0,5$ °C. At least two sensors shall be used. The sensors shall be mounted on the back of the DUT as close to the center of a cell assembly as possible, using one cell chosen from the central part of the DUT and the second near the edge of the DUT. If placement of DUT temperature sensors requires modification of the DUT, then the modification shall be done by the manufacturer.

8.4.2 Ambient temperature sensor

The ambient temperature sensor shall have an accuracy of ± 1 °C, and a repeatability of $\pm 0,5$ °C. The temperature sensor shall be installed within a multi-plate radiation shield with passive ventilation and within 10 m of the DUT.

8.4.3 Lens or optics temperature sensor

The optics temperature sensor shall have an accuracy of ± 1 °C, and a repeatability of $\pm 0,5$ °C. The response time should be on the order of 1 s or less. The temperature sensor shall be selected to provide minimal interference to incoming light to the optics, i.e. as small as possible including wiring to the sensor. The actual transducer shall be attached to the surface of the optics using a method that ensures thermal conductivity. The side of the transducer which faces the sun shall be covered with a thin reflective foil or white film.

designed to reject/reflect incoming solar irradiance. The purpose of the foil or film is to minimize heating of the sensor due to sunlight exposure and improve the accuracy of measuring the optical surface temperature. The sensor location and wires shall remain fixed during measurements so that any impact on incoming irradiance to the DUT is constant throughout the test.

8.4.4 Temperature control system

The general requirements for temperature control are as follows:

- While measuring the DUT indoors per a solar simulator, the DUT temperature sensors shall be maintained at $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$. For indoor measurements temperature control can be generally achieved per laboratory room temperature controls. It is noted that appropriate solar simulators as described in 8.2 shall be used per indoor testing which do not heat the cells within the DUT more than $2 ^\circ\text{C}$ during the flash measurement. Continuous illumination of the DUT typically does not meet this requirement.
- DUTs, which have liquid or other temperature control systems per manufacturer designs, shall be tested with the cooling system active where this is appropriate.

8.5 Current-voltage measurement

The general requirements for I-V measurements are as follows:

- a) The I-V measurements may be done using a data acquisition package that can scan the I-V curve, or may use separate current and voltage sensors with a variable load. The manufacturer may require that an electrical load is used to maintain the DUT near or at MPP between I-V sweeps outdoors. It is known that operating at V_{oc} between I-V sweeps can elevate the lens temperature above what it would normally be at the given ambient conditions and therefore this operation mode can bias reported results. Voltages and currents shall be measured using instrumentation with an accuracy of 0,2 % of the open-circuit voltage and short-circuit current using independent leads from the terminals of the DUT and keeping them as short as possible. The measurement ranges of the data acquisition should be carefully chosen. The 4-wire connection should start at the terminals or connectors of the DUT.
- b) The short-circuit current shall be measured at zero voltage, using a variable bias (preferably electronic) to offset the voltage drop across the external series resistance. Alternatively, short circuit current may be extrapolated from the current-voltage characteristic. The curve is extrapolated to zero voltage provided that voltage drop is not higher than 3 % of the device open-circuit voltage and that there is a linear relationship between current and voltage.
- c) The direction of the I-V sweep shall be noted in the test report.
- d) The duration of a single I-V sweep shall be noted in the test report.

8.6 Anemometer

An instrument to measure wind speed (with a minimum threshold of 0,25 m/s and an accuracy of at least $\pm 0,15$ m/s at the minimum threshold) shall be installed within 3 m in the vertical orientation in relation to the mean height of the tracker module test plane when the tracker is in the vertical position. In the horizontal orientation the wind equipment shall be installed within 10 m of the DUT. The wind sensor shall not be installed in a location such that wind obstructions create a separate and different wind regime compared to the tracker to which the DUT is mounted.

8.7 Electrical load

An electrical load is a general device which can be used to maintain the DUT near or at MPP between I-V sweeps.

9 Test procedures

9.1 Measurement of DUT temperature coefficients

9.1.1 Purpose

CPV DUT thermal performance has two primary contributions: (1) cell electrical output depends on cell temperature (2) the optical focusing characteristics depend on the temperature of the optics (where cell electrical output depends on focusing characteristics). Subclause 9.1 herein is specific to measuring the DUT temperature coefficients that pertain to item (1) and not item (2). This is achieved by validating that the optical temperature is stable (as described in the data requirements) during the following testing. Item (2), performance associated with optical temperature, is addressed in 9.10 and 9.11.

9.1.2 Apparatus

General apparatus requirements are defined in Clause 8;

- a) normal incidence pyrheliometer;
- b) solar tracker;
- c) I-V measurement instrument (at least at a 1 min interval but 15 s or less is desired);
- d) anemometer;
- e) ambient temperature sensor;
- f) two DUT temperature sensors;
- g) spectral measurement device;
- h) pointing error sensor;
- i) one lens/optics temperature sensor.

9.1.3 Data collection procedure and data requirements

The following list provides recommendations and requirements for collecting various data as needed throughout this document:

- a) Mount the pointing error sensor, pyrheliometer, spectral measurement device, and other alignment sensitive equipment per 9.9.
- b) Mount the DUT per manufacturer's instructions or per 9.8. Document the alignment method that was used.
- c) Ensure that the irradiance measurement equipment viewing windows and DUT are clean and free from soil. Verify this throughout the duration of the test as necessary.
- d) Mount the DUT temperature sensors and anemometer per standard requirements in Clause 8.
- e) Mount the lens/optics temperature sensor defined per 8.4.3. The transducer location should be along the high side of the device's optical array. It is ideal to attach the transducer directly on the optics and at least 7 cm to 10 cm from the edge of the optical array in order to minimize edge effects. An I-V curve shall be recorded both before and after mounting the lens temperature sensor under equivalent irradiances. The I-V curves shall be compared to validate that maximum power decreases no more than 2 % due to the sensor interference. Note that this test data is not used to measure absolute DUT power output and therefore a 2 % loss that is consistent for all measurements can be tolerated. If interference is too high, the sensor can be moved to the edge of the active optical area and I-V curve validation shall be repeated. If the optics are of a design/material which have performance properties that are proven to be stable over a 10 °C change in temperature as applicable to the given test conditions, measurement of the optics temperature can be considered optional.
- f) It is recommended to record the following parameters at least every 15 s while the maximum interval shall be 1 min:

- time stamp;
 - I-V sweep;
 - DNI (within 1 s both before and after I-V sweep);
 - SMR values from standard component reference cells or as applicable from a suitable spectral measurement device;
 - wind speed;
 - pointing error as related to the DUT;
 - ambient temperature;
 - DUT temperature (2);
 - lens temperature.
- g) Cover the DUT with a cloth or other cover to allow for cooling of the DUT. It is expected that diffuse light will penetrate a cloth and V_{oc} will not be zero during the cooling but this does not interfere with achieving accurate results. Test results have indicated that if the cloth or cover rests on the optical surface of the DUT that the optics can cool more than 2 °C after the cloth or cover is removed (resulting in false temperature coefficients). This issue has been resolved by elevating the cloth more than 7 cm from the optical surface while the DUT cools. The elevation allows air at near ambient temperature to pass between the cover and the optics, avoiding heating of the optics. Monitor the DUT temperature sensors to ensure the DUT has cooled sufficiently from precovered conditions (investigations of various high concentration CPV modules have shown that at least 15 °C of cooling can be achieved). After the DUT temperature has cooled and is stable to within 2 °C over a 5 min period, the DUT is quickly uncovered (<2 s) while I-V curves and the additional parameters are measured as the DUT heats. It is assumed that in the first few seconds after removing the cloth the cell temperature and DUT temperature sensors are not moving in parallel (the cell heats rapidly in ms while the DUT temperature sensors lag behind). After the first 3 s to 5 s the cell and the DUT temperature increase at an approximate one-to-one rate. This one-to-one rate makes it possible to use the measured changes in DUT temperature as a proxy for changes in cell temperature.
- h) The following shall be true to use the data collected after an uncover event for determining temperature coefficients: note that the data collection period for determining a temperature coefficient can be shorter than the time period from when the uncover occurs to the last I-V curve. The data collection period is considered to begin at the first valid I-V curve after the uncover event until the last valid I-V curve while the DUT heats. For example the last valid curve might occur because a cloud passes in front of the sun, the wind speed increases, or the rate of increase in DUT temperature is significantly less than the previous series of I-V curves.
- Data points can be deleted at the beginning and end of a data collection period but no data points shall be removed from within the remaining time interval.
 - For the remaining time interval the DUT temperature shall show at least a 10 °C change while 15 °C is recommended (this typically requires 5 min to 10 min of stable DNI per requirements below).
 - The remaining time interval shall span at least 5 min and contain at least 10 data points.
 - DNI immediately before and after each I-V sweep for all data points shall be within 0,5 %.
 - Maximum and minimum DNI throughout the data collection period shall be within 2 %;
 - DNI shall be between 700 W/m² and 1 100 W/m².
 - SMR(1,2), SMR(1,3) and SMR(2,3) shall be within 5 % of unity.
 - Instantaneous wind speed should be under 5 m/s (Note that wind blocks can be put in place to mitigate changes in wind speed from causing significant deviations in the heating rate of the DUT as well as to provide for a larger increase in DUT temperature during the test). Test results have shown improved fit results for the temperature coefficients when using wind blocks to decrease direct wind to the back side of the

DUT. Note that instantaneous wind speed is applicable here while average wind speed is used in other tests in this document. The DUT in this test is not at a steady-state condition and therefore the average wind speed is not applicable.

- The ambient temperature shall change no more than 1 °C during the data collection period. (The DUT manufacturer may request that this test is performed at an ambient temperature where it is known the lens/cell alignment is relatively stable.)
 - The lens temperature shall change no more than 2 °C throughout the data collection period.
 - Pointing error shall be within the limits as demonstrated by misalignment sensitivity data, see 9.8, which indicate that normalized MPP/DNI drops by no more than 1 %. Maintaining pointing error to be less than $\pm 0,1^\circ$ is generally recommended for this test.
 - The one-to-one increase for the average of DUT temperature sensors and the cell temperature shall be validated (see i) below).
 - The difference between the two DUT temperature sensors shall be constant to $\pm 1^\circ\text{C}$ during the data collection period. Note it is typically expected that the DUT temperature measurement near the center of the DUT will be higher than the measurement near the edge of the DUT.
- i) One-to-one increase for the average of the DUT temperature sensors and the cell temperature shall be validated per the following: (As stated above, data points can be deleted at the beginning and end of a data collection period and therefore this validation is only applicable to the remaining time interval). The validation is completed by plotting DUT V_{oc} against DUT temperature and fitting the data with a least squares regression. The following shall be true: (see Figure 5 and Figure 6 for an example of this procedure).
- The Root Square Error (RSE) as a percent of the least squares predicted value shall be less than or equal to 0,25 % for each data point. The RSE as a percent is defined as

$$RSE = \frac{100\sqrt{(V_{oc} - V_{oc,fit})^2}}{V_{oc,fit}}$$

- The coefficient of determination, R squared, shall be greater than or equal to 0,98.

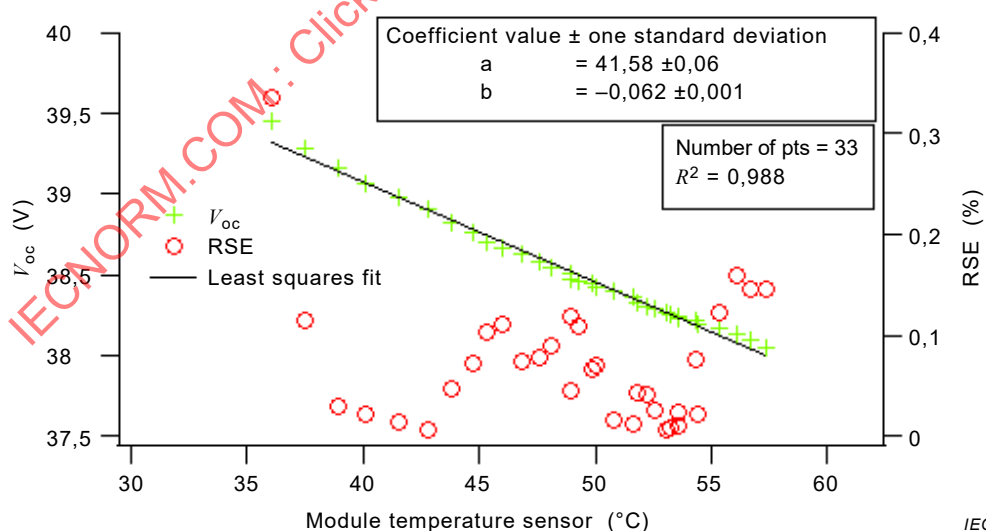


Figure 5 – V_{oc} data after an uncover event

Figure 5 shows V_{oc} data from I-V curves after an uncover event which are plotted against temperature data from the back of the DUT. The solid line is the least squares fit and the open circles are the RSE as a percent of the predicted value. The percent RSE and the coefficient of determination, R squared, are used to determine if relative changes in the DUT temperature sensor sufficiently represent changes in cell temperature. The percent RSE shall be less than or equal to 0,25 % for every data point and R squared shall be greater than or

equal to 0,98. In the graph, RSE is above 0,25 % for the first data point near 36 °C while R squared is greater than 0,98.

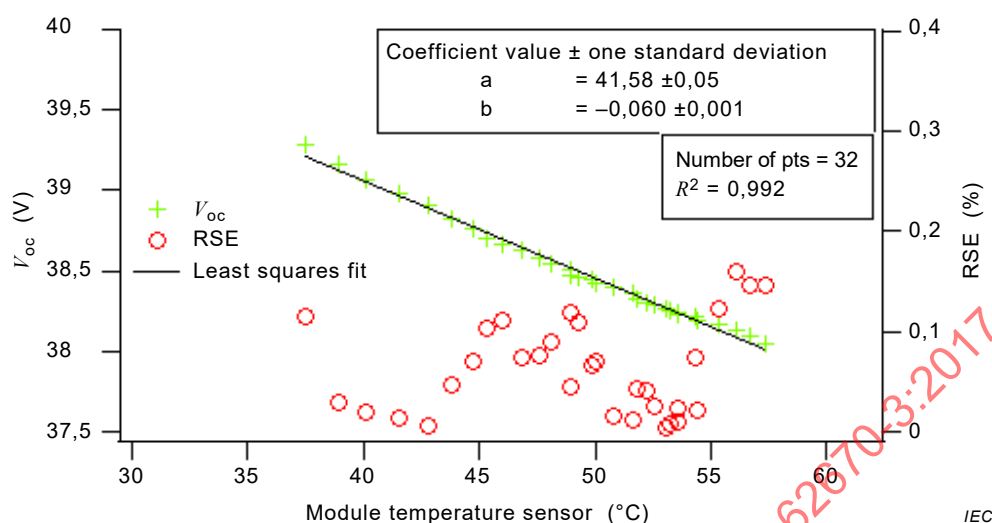


Figure 6 – Figure 5 repeated after removing one data point

Figure 6 is identical to Figure 5 other than the one data point from Figure 5 that exceeded the RSE requirement was removed and then the least squares fit was recalculated. The remaining data set meets the requirement of this subclause.

9.1.4 Temperature coefficient determination

The procedure described in 9.1.3 shall be repeated as many times as necessary to have acceptable data from at least 5 different uncover events which are from at least 2 different days. The maximum tolerable deviation between the average temperature coefficients for DUT efficiency on the two separate days shall be within 30 % or the test shall be repeated. For each unique uncover event create plots of the average of the 2 DUT temperature sensors against V_{oc} , I_{sc}/DNI , η , and FF. Calculate the least squares fit for each plot. The slope of the least squares fit is an individual instance of a particular coefficient for the given DUT. The “ b ” coefficient in Figure 6 is an example of an individual instance of the V_{oc} coefficient for the given device. The reported temperature coefficients shall be the average coefficient determined from at least 5 or more acceptable uncover events. Throughout this document, δ is the coefficient of efficiency (absolute %/K), β is the coefficient of V_{oc} (V/K), and α the coefficient for I_{sc} (A/K). (Note that the plot described above is for I_{sc}/DNI therefore to determine α the average slope for I_{sc}/DNI shall be multiplied by the reference irradiance which is 900 W/m^2 as applicable to Equation (5). Note that DUT efficiency is calculated per Equation (9).

Note that it is recommended that data from an uncover event be excluded if the associated least squares fit for FF meets either of the following criteria:

- $R^2 > 0,7$ and the slope is greater than 0 %/K,
- $R^2 > 0,7$ and the slope is less than $-0,1 \text{ %/K}$,

This recommendation is based on the assumption that the FF coefficient for multiple junction cells is typically near $-0,05 \text{ %/K}$. If the measured FF coefficient is over a 100 % different relative to this typical value (as in the above recommended exclusions) it is thought that this is likely due to lens temperature effects which the above test was not intended to include. Test results have shown for various CPV DUTs that if the lens temperature variation is held to less than 2 °C the FF recommend range is achieved.

9.2 DUT reference V_{oc} at (900 W/m² and 25 °C cell temperature)

9.2.1 General

The DUT reference V_{oc} is primarily used as an input to the calculation of cell temperature when the CPV device is on-sun outdoors. The cell temperature calculation is sensitive to uncertainty in the reference V_{oc} and therefore high accuracy is desired in the determination of the reference V_{oc} . Two methods are provided for determining the reference V_{oc} , dark I-V and simulator based measurements. When calculating cell temperature, it is ideal to use a reference V_{oc} at the mean irradiance for the outdoor I-V data set for the DUT and 25 °C: 900 W/m² has been prescribed here as this is the middle value in the permissible range of irradiances (700 W/m² to 1 100 W/m²). (An alternate reference irradiance or temperature can be used assuming all necessary terms are modified accordingly in the cell temperature calculation and changes are documented in the test report.)

9.2.2 Reference V_{oc} dark I-V procedure

The following provides procedures and equations for determining the reference V_{oc} from dark I-V curves measured for the DUT.

The reference V_{oc} shall be determined by measuring successive dark I-V curves on the DUT, one curve beginning at zero current and ending at least 1,7 times the expected I_{sc} under 1 000 W/m², the other curve beginning at 1,7 times the expected I_{sc} under 1 000 W/m² and ending at zero current (the outdoor I-V data set and assumed linearity between I_{sc} and irradiance can be used to determine the expected I_{sc} under 1 000 W/m²). The manufacturer may need to provide a DUT that has had blocking diodes removed in order to make dark I-V measurements possible. Caution shall be taken by limiting maximum currents achieved (per manufacturer instructions) during the dark I-V measurement so as not to damage the DUT. The dark I-V measurements shall be conducted in a controlled environment that ensures the DUT is at (25 ± 2) °C. (As stated prior, an alternate reference temperature can be used assuming all necessary terms are modified accordingly in the cell temperature calculation and changes are documented in the test report.) Temperature shall be verified by at least one DUT temperature sensor. The device for conducting the dark I-V should either have sufficient speed or be a pulsed measurement system in order to ensure that the cell(s) does not heat sufficiently due to the injected current. The hysteresis between the two dark I-V curves shall be used to determine that no more than 2 °C heating has occurred. Heating shall be measured as the hysteresis voltage divided by β (see 9.1.4 for determination of β).

The individual voltage points of the dark I-V curve are translated to corresponding light conditions per Equation (1) where V represents voltage, I current, and R_s resistance. The subscripts light and dark represent light and dark conditions respectively and R_s represents the series resistance of the DUT. Note that Equation (1) is not considered a valid method to translate the entire dark I-V curve to lighted conditions, rather it is only considered valid for determining the reference V_{oc} in lighted conditions.

$$V_{light} = V_{dark} - I_{light} \times R_s \quad (1)$$

Equation (1) becomes Equation (2) when it is evaluated to solve for the reference V_{oc} (V_{ocr}).

$$V_{ocr} = V_{dark}(I_{scr}) - I_{scr} \times R_s \quad (2)$$

$V_{dark}(I_{scr})$ is the voltage point on the dark I-V curve where $I_{dark} = I_{scr}$. I_{scr} is measured per 9.4. The series resistance shall be extracted from the high current region of the dark I-V curve. The high current region is recommended to be limited to dark I-V pairs where the voltage is greater than $(V_{oc} + V_{mp})/2$. V_{oc} and V_{mp} can be estimated from outdoor I-V data. The series resistance shall be considered equal to the intercept of the linear fit of the dark I-V data

plotted as $\frac{dV}{dI}$ against $\frac{1}{I}$. If the plot of $\frac{dV}{dI}$ against $\frac{1}{I}$ shows significant nonlinear behavior at the lower current/voltage pairs, the nonlinear portion should be excluded from the fit (one may exclude I-V pairs for voltages up to but not greater than V_{oc}). If the intercept of the fit is negative, the series resistance shall be considered zero for the purpose of evaluating Equation (2).

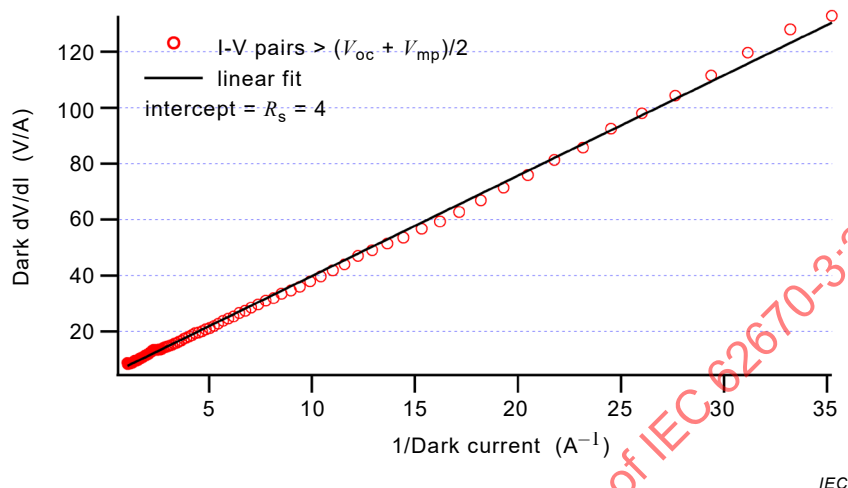


Figure 7 – The derivative of dark I-V data plotted to determine R_s

Figure 7 shows the derivative of the dark I-V data in the high current region as it is used to extract the series resistance for the DUT. The open circles in Figure 7 are the calculated derivatives between successive dark I-V pairs for I-V pairs for $V > \sim (V_{oc} + V_{mp})/2$. The series resistance is determined from the intercept of the solid line, which is the linear fit for the open circles. Caution shall be taken to avoid including nonlinear behavior at lower currents per the dark I-V data set.

9.2.3 Reference V_{oc} using a solar simulator

The following provide requirements for determining V_{ocr} per a solar simulator.

- If a separate indoor reference irradiance sensor is used: The temperature control system is used to maintain the DUT at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. The solar simulator is adjusted so the indoor reference irradiance sensor achieves $I_{sc,cal}$ while an I-V curve is measured for the DUT. V_{ocr} is determined as the V_{oc} from the measured I-V curve.
- If the DUT serves as the indoor reference irradiance sensor: The temperature control system is used to maintain the DUT at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. The solar simulator is adjusted so that $I_{sc,hot900}$ (see Equation (4)) is achieved per the illuminated I-V curve measured for the DUT. The $\sim V_{ocr}$ is determined as the V_{oc} from the measured I-V curve. The average cell temperature associated with $I_{sc,hot900}$ (see Equation (4) and 9.4.3) is calculated per 9.3, where $I_{sc,hot900}$ and $\sim V_{ocr}$ are used as reference values. Equation (5) is then used to correct $I_{sc,hot900}$ to 25°C (i.e. determine $I_{scr} = I_{sc,cal}$ for the DUT). The simulator is now set to achieve $I_{scr} = I_{sc,cal}$ for the DUT and V_{ocr} is determined per the illuminated I-V curve. (See Figure 8 for a graphical representation of this procedure.)

9.3 Calculating the average DUT cell temperature

9.3.1 Purpose

There is no accepted method available for directly measuring the temperature of cells operating under concentrated light. DUT performance is correlated with cell temperature and therefore it is valuable to calculate on-sun cell temperature for every outdoor power measurement. The procedure described hereafter is consistent with IEC 60904-5 as applied

to DUTs with multijunction cells. The described calculation is applicable when correcting outdoor performance measurements to CSTC and CSOC conditions.

9.3.2 Procedure

Equation (3) is used to calculate the equilibrium mean solar cell junction temperature within a CPV DUT for a given I-V curve measured outdoors.

NOTE Equation (3) is evaluated in Kelvin, not Celsius.

$$T_c = \frac{V_{oc} - V_{ocr} + \beta \times T_r}{N_s \left(\frac{nk}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{scr}} \right) + \beta} \quad (3)$$

where

V_{oc} is the measured DUT open-circuit voltage, (V);

N_s is the number of cells in series within the DUT;

V_{ocr} is the DUT open-circuit voltage at 298,15 K and 900 W/m² (see 9.2).

Note the V_{ocr} can be at an alternate temperature and irradiance but that I_{scr} and T_r shall be modified to these alternate conditions.

n is the diode ideality factor for cell (dimensionless, 3 assumed for triple junction cells, 4 with four junction cells);

k is the Boltzmann's constant, 1,380 66 x 10⁻²³, (J/K);

T_c is the calculated average temperature of cells inside DUT, (K);

q is the elementary charge, 1,602 18 x 10⁻¹⁹, (C);

I_{sc} is the measured DUT short-circuit current, (A);

I_{scr} is the DUT short-circuit current at 298,15 K and 900 W/m² (see 9.4);

β is V_{oc} temperature coefficient, (V/K) (see 9.1);

T_r is the reference temperature for cell measurements, (298,15 K).

9.4 Reference irradiance sensor calibration and reference I_{sc} determination

9.4.1 Purpose

The indoor reference irradiance sensor and the DUT shall be measured outdoors to determine I_{sc} at reference conditions (the actual DUT can serve as the indoor reference sensor or this can be an alternate sensor, see 8.1.5). The indoor reference irradiance sensor is used to set the output of the solar simulator for determining performance at CSTC while the reference I_{sc} for the DUT is also used for calculating on-sun cell temperature. The following method describes determination of a calibration of I_{sc} under natural sunlight against a pyrheliometer (traceable to world radiometric reference, see 8.1.1) under a limited range of spectral conditions per measurements of the spectrum with spectral measurement device (calibrated as primary or secondary reference cells, see 8.1.3). The reference irradiance sensor is calibrated per I-V data collected according to 9.6.

9.4.2 Data requirements

Data requirements are identical to 9.7.1.

9.4.3 Determination of the calibrated and reference I_{sc} , ($I_{sc, cal}$ and I_{scr})

Note that $I_{sc, cal}$ and I_{scr} are both determined through the following procedure where $I_{sc, cal}$ is a calibrated short-circuit current for use as an indoor reference irradiance sensor and I_{scr} is a reference short-circuit current for a specific DUT and is used for outdoor cell temperature

calculation for that specific DUT. I_{scr} is specifically referenced to 900 W/m² but $I_{sc,cal}$ can be determined for other irradiances in the range of 700 W/m² to 1 100 W/m² per linear scaling, for example 1 000 W/m² per CSTC.

For all measured I-V curves fulfilling the data requirements per 9.7.1 calculate the hot I_{sc} at 900 W/m² per Equation (4), where N is the total number of filtered I-V curves. This is termed hot I_{sc} because outdoor I-V measurements are typically at higher cell temperatures than the 25 °C reference temperature.

$$I_{sc,hot900} = 900 \left(\sum_i \frac{I_{sc,i}}{DNI_i} \right) / N \quad (4)$$

The reference or calibrated I_{sc} is then calculated using the temperature correction per Equation (5), where the average cell temperature of the filtered I-V curves is given by Equation (6), (see 9.3 for cell temperature calculation and 9.1 for temperature coefficient determination).

$$I_{scr} = I_{sc,hot900} - \alpha(T_{c,avg} - T_r) \quad (5)$$

$$T_{c,avg} = \left(\sum_i T_{c,i} \right) / N \quad (6)$$

Note that the calculation of $T_{c,i}$ per Equation (3) requires I_{scr} , i.e. Equation (5), while Equation (5) requires the result of the cell temperature calculation. The interdependence of these two equations is overcome by using a single iterative approach as described below. The cell temperature, Equation (3), requires both a reference V_{oc} and I_{sc} . The first step is to use the filtered outdoor I-V data set to determine $I_{sc,hot900}$. $I_{sc,hot900}$ is then used to determine an approximate reference voltage ($\sim V_{ocr}$). The $\sim V_{ocr}$ is either calculated by substituting $I_{scr} = I_{sc,hot900}$ in Equation (2) or by measuring the DUT I-V curve under the solar simulator set to $I_{sc,calibration} = I_{sc,hot900}$. In either case the $\sim V_{ocr}$ is expected to be a reasonable approximation for calculating cell temperature. Equation (3) is evaluated using $V_{ocr} = \sim V_{ocr}$ and $I_{scr} = I_{sc,hot900}$. Equation (6) can then be determined with the approximate calculations for cell temperature and Equation (5) can be solved for I_{scr} . I_{scr} is now used with dark I-V data or a solar simulator to determine the V_{ocr} . Further iterations can be calculated but as the I_{sc} coefficient for a triple junction cell is typically on the order of 0,07 %/K, a second iteration is likely to have less than 0,5 °C impact on the calculation of $T_{c,avg}$, significantly less than the uncertainty in the cell temperature calculation.

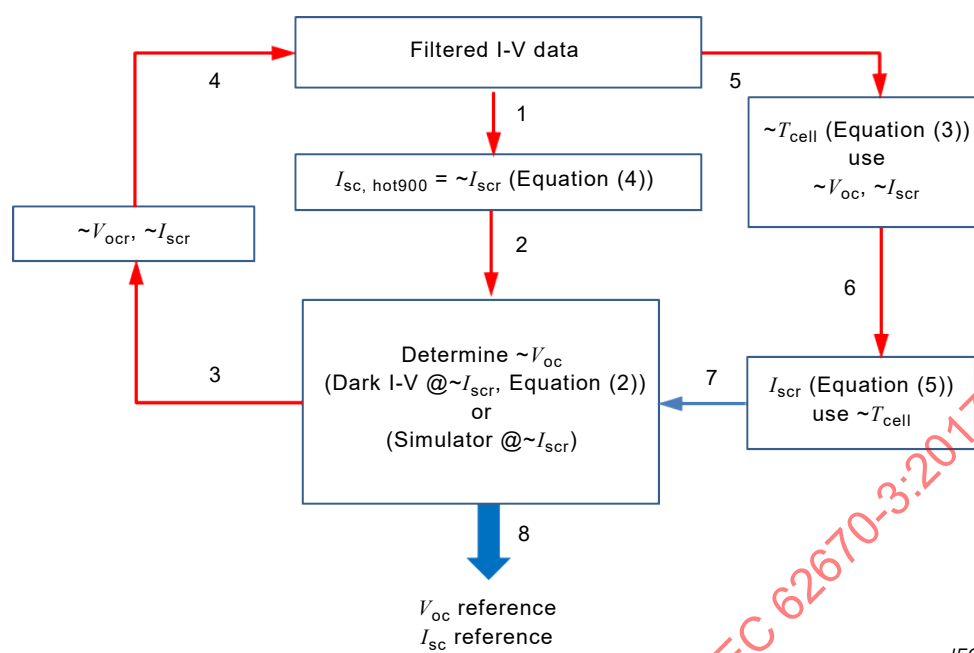


Figure 8 – Iterative approach to determine I_{sc} and V_{oc}

Figure 8 presents a flow chart that demonstrates the single iterative approach required to determine the reference values for I_{sc} and V_{oc} . The flow arrows are numerically labelled to clarify the movement direction through the chart. The reference values are determined at steps 7 and 8.

9.4.4 Calibration requirement

The calibration, $I_{sc,cal}$, shall be completed at least once a year but should be repeated if there are any indications that performance has changed for the indoor reference irradiance sensor. A side-by-side measurement against another reference unit of the same technology that has been stored indoors and shows no signs of degradation is a simple method to periodically verify stability of the reference unit that is in regular use.

Any changes in the test specimen technology that affect its spectral, angular or thermal sensitivities may annul the previously calibrated CPV reference unit as a valid reference sensor.

9.5 Indoor I-V measurements of a CPV DUT

9.5.1 Purpose

To determine the current-voltage characteristic of the DUT under a calibrated irradiance and 25 °C cell temperature.

9.5.2 General measurement requirements

The requirements for DUT solar simulator measurements are as follows:

- The indoor reference irradiance sensor, defined in 8.1.5 and calibrated as defined in 9.4, shall be used to determine absolute irradiance values per flash measurements of the DUT.
- The instantaneous irradiance shall be measured in the test plane throughout the period of the flash. This can be completed using the indoor reference irradiance sensor or the auxiliary irradiance sensor as necessary.
- Corrections to I-V measurements due to irradiance variation during flash shall be applied per IEC 60891. If the indoor reference irradiance sensor is separate from the DUT and it is

used to measure irradiance variation during the flash, then corrections will be calculated based on its I_{sc} response. If the indoor reference irradiance sensor is too large to be measured simultaneously with the DUT or if the DUT is also the indoor reference irradiance sensor, an auxiliary irradiance sensor shall be used to measure instantaneous irradiance variation throughout the I-V curve measurements and to determine irradiance corrections.

- d) The temperature of the irradiance sensor and the DUT shall be maintained per 8.4.4.
- e) Voltages and currents shall be measured using instrumentation per 8.5.
- f) The solar simulator used should be at least class cXXABA per IEC 60904-9-1³, where XX is value of the collimation angle of the simulator. For example c05ABA has a collimation angle of $\pm 0,5^\circ$. The collimation angle of the simulator shall be at least 10 % less than the value of the DUT acceptance half-angle as measured per 9.8 but not less than $\pm 0,26$ (the average collimation angle of natural sunlight).
- g) The SMRs specific to the DUT shall be determined at the time of the measurement of the DUT I-V curve and documented with the I-V curve. Examples include using a spectroradiometer of sufficient range or using component reference cells with the same spectral response as the cells in the DUT. The SMR for each combination of subcells shall be within a required tolerance of unity, depending on whether either subcell in question produces more than 25 % excess current compared to the other subcell under reference spectrum (see Table 1).

Table 1 – SMR requirements for indoor measurements

Current ratio between subcells under reference spectrum	Required SMR range
$0,75 < \frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} < 1,25$	$1 \pm 0,1$
$\frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} < 0,75$ or $\frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} > 1,25$	$1 \pm 0,2$

- h) The uniformity of irradiance intensity in the test area shall be known and periodically measured to verify that at least class B per IEC 60904-9-1⁴ is achieved.
- i) The distribution of irradiance intensity and angle in the test plane is not completely uniform. Therefore the effective irradiance is the averaged irradiance across a device's active area. For an indoor reference irradiance sensor smaller than the DUT, the reference unit should be measured at different locations within the envelope of the test specimen. The final mounting location of the indoor reference irradiance sensor may be different than the average over the DUT area and therefore a correction should be made and documented to account for this difference.
- j) Depending on the DUT, I-V measurements may be influenced by the voltage sweep rate and the sweep direction. Cells with high capacitance are more problematic. These effects should be analyzed and documented by comparing an I-V sweep starting from I_{sc} with a sweep starting from V_{oc} .
- k) Any non-uniformity of the irradiance incident on a DUT can affect the resultant I-V characteristics. This effect is influenced by: bypass diodes in the interconnection circuit of the DUT, the reverse I-V characteristics of the cell type and the irradiance distribution in the test area. Non-uniformity effects should be carefully analyzed and considered in the uncertainty analyses.

³ Under consideration.

⁴ Under consideration.

9.5.3 DUT indoor alignment procedure

The DUT, indoor reference irradiance sensor, auxiliary irradiance sensor (if applicable), and spectral measurement device shall be attached as to be coplanar in the mounting plane. While the simulator output is maintained at a fixed value, monitor the output of said devices while varying the angle of incidence with the collimated light source for each device. For final alignment each device should be at the center of the response curve verses alignment angle. It shall be validated that each device's output is within 0,5 % of the maximum achieved value.

9.5.4 Procedure for single-flash pulsed solar simulators

Single-flash pulsed simulators have unique procedures as follows:

- a) Trigger a flash pulse of the solar simulator light source.
- b) Trigger the measurement of the complete I-V curve for the DUT such that the instantaneous irradiance sensor produces the calibrated output centered in the I-V curve data acquisition period.
- c) Ensure that the SMR requirements of 9.5.2 g) are met throughout the portion of the flash pulse that the I-V curve is acquired.

9.5.5 Procedure for multi-flash pulsed solar simulators

Multi-flash pulsed simulators have unique requirements as follows:

- a) Trigger a flash pulse of the solar simulator light source.
- b) Measure a single point of the current and voltage characteristics of the DUT when the instantaneous irradiance sensor produces the calibrated output.
- c) Ensure that the SMR requirements of 9.5.2 g) are met throughout the portion of the flash pulse that the I-V data is acquired.
- d) Repeat steps (a) and (c) until sufficient current-voltage points are recorded.

9.6 Outdoor I-V measurements of a CPV DUT

9.6.1 Purpose

The objective is to determine the current-voltage characteristics of the DUT under varying outdoor conditions which are measured with each I-V curve. The following measurement procedure provides data collection which is applicable to reporting a CSOC power rating, a translated CSTC power rating, CPV reference irradiance sensor calibration, and cell temperature calculations.

9.6.2 Apparatus

Apparatus requirements are defined in Clause 8.

- a) normal incidence pyrheliometer;
- b) pyranometer;
- c) solar tracker;
- d) I-V measurement equipment;
- e) anemometer;
- f) ambient temperature sensor;
- g) DUT temperature sensor(s);
- h) spectral measurement device;
- i) pointing error sensor;
- j) electrical load to maintain the DUT at MPP bias between I-V measurements, if requested by manufacturer.

9.6.3 Procedure

The procedure for DUT outdoor I-V measurements is as follows:

- a) Mount the pointing error sensor, pyrhelimeter, spectral measurement device, and other alignment sensitive equipment per 9.9.
- b) Mount the DUT per manufactures instructions or per 9.8. Document the alignment method that was used.
- c) Ensure that the irradiance measurement equipment viewing windows and DUT are clean and free from soil. Verify this throughout the duration of the test as necessary. Cleaning shall be at a frequency of once per week or more.
- d) The tracker shall track the sun during collection of I-V curves with a 95th percentile accuracy which is less than half the DUT acceptance angle, accuracy metric per 7.4.6 of IEC 62817:2014. This ensures that the light is focused on the cell for the purpose of being at on-sun temperatures. Note that pointing error requirements are more stringent for acceptance of I-V curves for performance measurements.
- e) At least every minute, record the following parameters
 - time stamp;
 - DNI;
 - ambient temperature;
 - pointing error as related to the DUT.
- f) Filtering requirements are based on average wind speed. The average wind speed data shall be based on at least a 30 s sampling rate while 5 s is recommended due to the rapid changes of wind conditions. Note that in some other test procedures in this document wind speed requirements or recommendations are in reference to instantaneous wind speed. The requirements in this subclause are based on 5 min average wind speed for the following reason: CPV DUTs typically have sufficient thermal mass that the absolute device performance has a higher correlation with 5 min average wind speed as compared to instantaneous wind speed. This means that short gusts in the wind speed above 5 m/s typically do not have a high impact on DUT performance and that the using the 5 min average wind speed is allows more flexibility for measuring acceptable I-V curves.
- g) Record DUT I-V sweeps at an interval ranging from 1 min to 15 min per 8.5. The following data is required at the time of the I-V sweep.
 - time stamp;
 - DNI (within 1 s both before and after I-V sweep);
 - GNI;
 - ambient temperature;
 - DUT temperature;
 - SMR values from standard component reference cells or as applicable from a suitable spectral measurement device;
 - pointing error as related to the DUT.

9.6.4 Report

In addition to data indicated in 9.6.3, the following needs to be reported for outdoor I-V data:

- a) spectrum measurement equipment (component reference cell info, spectroradiometer model, collimator tube specifications/geometry, etc.);
- b) description of DUT mode between I-V sweeps;
- c) I-V sweep duration;
- d) I_{sc} ;
- e) V_{oc} ;

- f) MPP;
- g) DUT alignment method;
- h) any additional restrictions to data filtering.

9.7 CSOC and CSTC power ratings

9.7.1 Data filtering requirements for CSOC or CSTC translation

Data filtering requirements are designed to achieve repeatable performance measurements for the DUT.

- a) Data shall contain at least 5 separate SMR crossings within 3 % of unity (see Clause 3) and be collected on at least 3 different days.
- b) The DUT shall be approximated as thermally stable per the following, using data collected at least in one minute intervals:
 - DNI fluctuates less than 40 % between maximum and minimum values for the 30 min before the I-V curve begins;
 - DNI fluctuates less than 10 % between maximum and minimum values for the 10 min before the I-V curve begins;
 - ambient temperature changes by no more than 5 °C in the 30 min before the I-V curve begins.
- c) Retain only I-V data which meet the following conditions:
 - DNI is between 700 W/m² and 1 100 W/m²;
 - ambient temperature is between 0 °C and 40 °C;
 - DNI to GNI ratio > 0,8;
 - 5 min average wind speed is between 0,5 m/s and 5 m/s;
 - DNI fluctuates by less than ±1 % before and after the I-V curve;
 - SMR(1,2), SMR(1,3) and SMR(2,3) are within 3 % of unity. If the test laboratory can determine from the outdoor data set that only two subcells are current limiting the DUT, it is recommended that the SMR which includes both these subcells be limited to ±1 %;
 - If more than 3 component cells are used as allowed based on the DUT per 8.1.4, the SMRs in this case shall be filtered to within 3 % of unity unless the test laboratory can demonstrate and document alternate filtering criteria are more suitable to the DUT. In the event that alternate filtering criteria are used, at least one SMR value shall have a mean value for the filtered data set that is within 0,25 % of unity;
 - instantaneous pointing error recorded at the time of the I-V sweep shall be less than the 98 % half acceptance angle, see Clause 3 and less than 0,2°;
 - filtering symmetrically around 20 °C ambient temperature can be requested by the manufacturer to limit variation in lens performance.
- d) It is possible that the optical focusing characteristics will be insensitive to temperature at lens temperatures that occur at or near CSOC conditions but could become sensitive as large deviations from CSOC are allowed. The above minimum and maximum allowable ambient temperatures are wide ranging to provide flexibility for test laboratories. However, some optical systems may have significant change in optical focusing characteristics within the temperature range encountered during an outdoor evaluation, so this assumption shall be examined and reported by including a plot of I_{sc}/DNI versus ambient temperature (Note that I_{mp}/DNI may be more sensitive to optical focusing characteristics and can also be considered). See 9.10 for more details on outdoor lens temperature performance tests. In some cases, systematic trends may be seen that are caused by spectral effects that correlate with temperature. In all cases, the uncertainty introduced into the power rating by a possible sensitivity of the optical focusing characteristics to temperature shall be quantified and included in the report. The manufacturer can specify

that the test laboratory apply a specific symmetric minimum and maximum around the 20 °C ambient temperature to reduce uncertainty associated with temperature variation.

9.7.2 CSOC power determination

Outdoor data that have been filtered per 9.7.1 (representing AM1.5 spectral conditions) shall be used to determine performance at CSOC. CSOC performance can be calculated per Equations (7) to (12). P_{CSOC} and η_{CSOC} denote power and efficiency at CSOC. $\eta_{\text{CSOC},i}$ denotes the maximum efficiency of an individual I-V measurement, i , after correcting to the CSOC condition while $\eta_{\text{I-V},i}$ is the MPP efficiency of the I-V measurement before correction. $f_{\text{V,CSOC},i}$ is an intensity correction for the voltage, $T_{\text{amb},i}$ is the ambient temperature during the I-V measurement, f_{DNI} is a temperature correction based on DNI, and $MPP_{\text{I-V},i}$ is the maximum power point of an individual I-V curve. All other terms are defined in 9.1, 9.2, and 9.3.

$$P_{\text{CSOC}} = 900 \times \eta_{\text{CSOC}} \times \text{Aperture} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{CSOC}} = \left(\sum_i \eta_{\text{CSOC},i} \right) / N \quad (8)$$

$$\eta_{\text{CSOC},i} = f_{\text{V,CSOC},i} [\eta_{\text{I-V},i} - \delta \{ (T_{\text{amb},i} - 20) + f_{\text{DNI}} (DNI_i - 900) \}] \quad (9)$$

$$\eta_{\text{I-V},i} = \frac{MPP_{\text{I-V},i}}{DNI_i \times \text{Aperture}} \quad (10)$$

$$f_{\text{V,CSOC},i} = 1 + \frac{N_s n k T_{\text{c},i}}{q V_{\text{oc},i}} \ln \left(\frac{900}{DNI_i} \right) \quad (11)$$

$$f_{\text{DNI}} = \left(\sum_i \frac{T_{\text{c},i} - T_{\text{amb},i}}{DNI_i} \right) / N \quad (12)$$

9.7.3 CSTC power determination

9.7.3.1 General

Two methods are available for CSTC power determination. Outdoor data that have been filtered per 9.7.1 (representing AM1.5 spectral conditions) can be translated to the CSTC condition or a solar simulator can be used.

9.7.3.2 Translating data collected outdoors to a CSTC power determination

Equations (13) to (16) shall be used to translate outdoor data that have been filtered per 9.7.1 to the CSTC condition. P_{CSTC} and η_{CSTC} denote power and efficiency at CSTC. All other variable terminology is consistent with 9.7.2.

$$P_{\text{CSTC}} = 1\,000 \times \eta_{\text{CSTC}} \times \text{Aperture} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{CSTC}} = \left(\sum_i \eta_{\text{CSTC},i} \right) / N \quad (14)$$

$$\eta_{\text{CSTC},i} = f_{\text{V,CSTC},i} \{ \eta_{\text{I-V},i} - \delta(T_{\text{c},i} - T_{\text{r}}) \} \quad (15)$$

$$f_{\text{V,CSTC},i} = 1 - \frac{N_{\text{s}} n k T_{\text{c},i}}{q V_{\text{OC},i}} \ln \left(\frac{\text{DNI}}{1\,000} \right) \quad (16)$$

While the above paragraph presents a method to translate outdoor data to CSTC it is not expected that indoor CSTC data will be translated to CSOC. This translation would require measurement of a nominal outdoor cell temperature for the DUT (i.e. the temperature associated with the translation to CSOC). This temperature determination is only available through outdoor data collection and therefore CSOC should be directly determined from this outdoor data set.

9.7.3.3 CTSC power determination through solar simulator measurements

Indoor determination of CSTC is as follows:

- Solar simulator I-V curves shall be measured per 9.5.
- If the simulator is set so that the indoor irradiance sensor produces an output equivalent to 1 000 W/m², the MPP from the simulator I-V curve shall be reported as power at CSTC.
- The simulator may be set so that the indoor irradiance sensor produces output equivalent to 700 W/m² to 1 000 W/m². The range of irradiances provides more opportunity for the test laboratory to tune the spectral conditions of a given simulator and hence achieve more appropriate spectral conditions for the DUT. In the event that an irradiance other than 1 000 W/m² is applied the CSTC power is determined through Equation (13) where Equations (17) and (18) determine η_{CSTC} . The subscript "SIM" indicates pertaining to the simulator and all other variable terminology is consistent with 9.7.3.2. DNI is measured per the indoor reference irradiance sensor.

$$\eta_{\text{CSTC}} = \eta_{\text{I-V,SIM}} \times f_{\text{V,SIM}} \quad (17)$$

$$f_{\text{V,SIM}} = 1 - \frac{N_{\text{s}} n k T_{\text{r}}}{q V_{\text{OC,SIM}}} \ln \left(\frac{\text{DNI}}{1\,000} \right) \quad (18)$$

9.8 DUT alignment procedure and measurement of misalignment sensitivity

9.8.1 Purpose

This procedure provides a repeatable means to mount the DUT and results in data which both documents accuracy of alignment and results in determination of DUT acceptance angle. Characterization of acceptance angle is further divided into reporting per 2 axis measurements or a two dimensional plot. Note that this procedure is not required as the manufacturer can specify alignment instructions and provide acceptance angle and 98 % acceptance angle data as used to establish pointing error requirements for performance measurements.

9.8.2 Apparatus

Apparatus requirements are defined in Clause 8:

- solar tracker;
- pyrheliometer, the alignment sensitivity can be measured in a range of $\pm 0,75^\circ$ with an ideally aligned pyrheliometer. For ranges greater than $\pm 0,75^\circ$ a pyrheliometer shall be mounted on an independent tracker for the purpose of normalizing the DUT power output by DNI;

- c) pointing error sensor, the sensor shall be able to measure the pointing error in a range that is at least as large as the alignment sensitivity range under test;
- d) I-V measurement equipment (DNI normalized MPP from I-V curves is considered the best measure of misalignment sensitivity);
- e) anemometer;
- f) ambient temperature sensor;
- g) DUT temperature sensor(s);
- h) spectral measurement device.

9.8.3 Recommendations for initial DUT mounting

For sufficiently small and light DUTs, mount the DUTs to the tracker via 3-point spring loaded configuration or other suitable adjustable 3 point mounting. A three point configuration allows for simple fine tuning of the DUT orientation. For larger DUTs, use the manufacturer's standard mounting locations. In this configuration shims or threaded rods can be used to fine tune the DUT orientation. Initial alignment of the DUT is sufficient by one of the following as this is not the final confirmed alignment:

- trimming to an alignment indicator built into the DUT (if present);
- trimming to align the lens sunspot(s) onto the secondary optics or cell (if externally visible). Note that welding goggles of sufficient shade factor are typically required for viewing the sunspot on a secondary optic or the cell;
- trimming to maximize I_{sc} or MPP when DNI is stable.

9.8.4 General requirements

Requirements during the alignment procedure are as follows:

- a) It is recommended to mount the DUT within 1 m of the pointing error sensor due to the potential for the tracker structure to deflect under wind loads or per orientation. If the pointing error sensor is mounted more than 2 m from the DUT, it shall be confirmed that the tracker is sufficiently stiff so as not to impact performance of the DUT.
- b) Ensure that the pyrheliometer window and DUT are clean and free of soiling.
- c) Allow the tracker to track the sun to within half the DUT manufacturer's estimated acceptance angle for period of 30 min where DNI is above 700 W/m² to achieve temperature stabilization.
- d) The data collection for alignment characterization shall be completed in no more than one hour. The procedure shall be completed in this time interval to minimize uncertainty associated with changing spectral conditions.
- e) For the duration of the test, ensure that the ambient temperature is between 0 °C and 40 °C, the DNI is between 700 W/m² and 1 100 W/m², and the 5 min average wind speed is between 0,5 m/s and 5 m/s. Note that as most lens performance is not optimized for temperatures as low as 0 °C, it is recommended that the alignment procedure be completed when the ambient temperature is above 10 °C.
- f) For the duration of the test, ensure the variation from maximum to minimum DNI is no more than 5 %.
- g) Note that changing wind speeds during the alignment test can impact results by causing the DUT temperature to vary and therefore it can be beneficial to place wind blocks in place near the back edges of the DUT.

9.8.5 Individual off-axis sweeps and final DUT alignment

The following procedure provides confirmation of DUT alignment.

- a) While meeting the general requirements, maintain tracking in one axis and permit the tracker to misalign in the other axis. (The method of misalignment depends on the tracker in use. For example some tracker controllers provide commands to offset tracker pointing

from ideal. Alternatively a closed loop control system can be manipulated by trimming the sun pointing sensor in small increments). At intervals of 1 min or less, perform I-V sweeps for at least 10 increments of misalignment for the axis under test. The specified meteorological parameters and primary and secondary axis pointing error shall be recorded within 1 s of each I-V curve. A full range of $1,5^{\circ}$ ($\pm 0,75^{\circ}$) is typically sufficient range for misalignment and is the maximum that can be achieved without having a NIP measurement on an alternate tracker. Repeat the procedure for the second axis.

- b) For each data set plot normalized maximum power divided by DNI as a function of measured primary axis pointing error or measured secondary axis pointing error respectively. Data used for each respective plot shall be filtered so that no pointing error outside $\pm 0,08^{\circ}$ for the alternate axis is included. This filtering ensures that the plots reported are specific to misalignment in the axis under test for the DUT.
- c) If the DUT delivers at least 99 % of the maximum normalized power at zero primary and secondary axis pointing error and the plots are centered to within $0,1^{\circ}$ at zero error, then the DUT is considered sufficiently aligned. If not, then using the plots as a guide, adjust the DUT alignment and repeat steps (a) and (b). Figure 3 is an example plot that demonstrates both a sufficiently aligned DUT and a graphical representation of acceptance angle.

9.8.6 Alternate ellipse plot procedure for reporting misalignment sensitivity

An elliptical plot provides additional data beyond 2-axis misalignment sensitivity.

- a) During clear sky conditions and meeting the general requirements, varying pointing error in both the primary and secondary axis in a range of at least $\pm 0,75^{\circ}$ (both axes can be varied at the same time). At intervals of 1 min or less, perform I-V sweeps. The specified meteorological parameters and primary and secondary axis pointing error shall be recorded within 1 s of each I-V curve.
- b) Bin data where DNI normalized MPP is greater than Z % where Z is:
 - 0,99,
 - 0,98,
 - 0,97,
 - 0,96,
 - 0,94,
 - 0,92,
 - 0,90.
- c) For each bin, create an XY scatter plot where the X and Y axes correspond to the primary and secondary axes. On each plot inscribe the largest possible ellipse centered at 0,0 which does not contain any of the scatter points. The ellipse's axes should be aligned with the X and Y axes. Note the ellipses axes lengths.
- d) Plot the ellipses axes lengths as a function of Z . This plot indicates the power output as a function of misalignment in relation to the primary and secondary axes.

9.8.7 Reporting

The report consists of the following:

- a) mounting method;
- b) date and time of test;
- c) latitude and longitude of test location;
- d) graphs of normalized power output as a function of misalignment.

9.9 Mounting and aligning the pointing error sensor and other alignment sensitive equipment

9.9.1 Purpose

The primary purpose of the following procedure is to provide a method to determine proper alignment of equipment (to the sun's direct beam) used throughout this document. Precise alignment of the various equipment is critical for establishing validity of reported performance of the DUT. Theoretically a solar tracker has a single mounting plane for mounting DUTs and other alignment sensitive equipment. In practice a tracker typically has a mounting structure which is not perfectly flat and therefore has an infinite number of mounting planes. To avoid this complexity the pointing error sensor shall serve as the representation of the single plane to which all DUTs and alignment sensitive equipment are mounted. Although perfectly aligning to this single plane is not possible, plots of a sweep of pointing error against a respective device output provide quantification of the alignment that has been achieved with the given device. If necessary, the quantified misalignment provides for precise alignment adjustments or documented numerical corrections for a given data sets.

9.9.2 Procedure

- 1) First mount the pointing error sensor on the solar tracker such that it is aligned to the general mounting plane that will be used to support other sensors and DUTs.
- 2) It is recommended but not required to mount a permanent non-electronic geometric alignment device within 1 m of the pointing error sensor. Two parallel plates connected by a rod can serve as this primary alignment device, the topmost plate having a pinhole which projects the collimated sunlight onto a target on the second parallel plate. Visually align the geometric device so that it is at the zero position when output from the pointing error sensor is as near to zero as possible. This device is geometrically similar to the pinhole alignment devices built into pyrhelimeters. While a pyrhelimeter can serve as a geometric alignment device it shall be removed periodically for calibration and therefore does not provide the benefits of a permanent device. This recommendation is for the following reasons:
 - the pointing error sensor may need to be removed from the tracker for calibration or other reasons. A permanent reference more easily facilitates such events;
 - the pointing error sensor does not always have a visual confirmation of alignment which can be valuable for various reasons;
 - the geometric device serves as a redundant check that the pointing sensor is functioning and is aligned as expected.
- 3) Mount the pyrhelimeter, component reference cells, or other alignment sensitive meteorological equipment within 1 m of the pointing error sensor while confirming that the output of the pointing error sensor is as near to zero as possible. It is typically sufficient that alignment sensitive equipment and the pointing error sensor are within $0,1^\circ$ of each other. Note that pyrhelimeter data is specifically used per alignment sensitivity measurements and therefore any misalignment between the pyrhelimeter and the pointing error sensor limit the range of alignment sensitivity testing. It is generally recommended to complete an alignment sensitivity sweep (see 9.8.5) which is specific to the meteorological equipment to generate data which confirms alignment. The meteorological equipment as specified in this document has collimating tubes such that the opening full-angle is 5° and the slope angle is 1° . This geometry results in significant reduction in output at a $0,75^\circ$ deviation from optimal alignment. Plots of a particular sensor output against primary and secondary axis pointing error can be used to document alignment.

9.10 Outdoor lens temperature performance test

9.10.1 General guidance

It is known that CPV DUT performance can vary significantly with lens temperature, where the magnitude of the dependence varies with optical design. Due to this significance, DUT performance should be characterized as a function of lens temperature or ambient

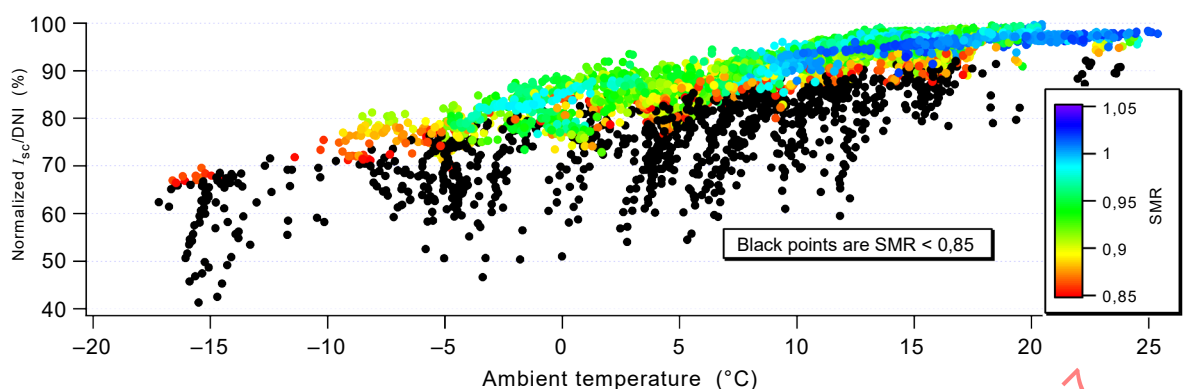
temperature. Deriving performance coefficients based on lens temperature measurements is the preferred approach but if lens temperature sensors are not possible ambient temperature can be used in lieu of lens temperature for outdoor measurements. It has been generally shown for outdoor measurements that ambient temperature is a relative indicator of changes in lens temperature for CPV modules with air cavities between the primary optic and the solar cell but this has not been demonstrated for other optical designs. Ambient temperature should not be used for designs without air cavities unless further investigations validate the use of ambient in lieu of lens temperature. It should also be noted that such variation in performance with lens temperature is not expected to be linear across all temperature ranges and therefore results should not be extrapolated to other temperatures. In the following procedure I_{sc}/DNI is used to measure DUT performance changes while changes in lens temperature can also impact the DUT fill factor. In order to collect the relevant range of lens temperatures outdoors, it is clear that there will be a significant range of cell operating temperatures. I_{sc}/DNI is specifically used as I_{sc} is less sensitive to cell temperature changes than MPP/DNI.

9.10.2 Procedure

Outdoor I-V data should be collected per 9.6 (outdoor I-V measurements). The I-V data should be filtered as follows:

- a) The DUT should be approximated as thermally stable per the following, using data collected at least in one minute intervals:
 - DNI fluctuates less than 40 % between maximum and minimum values for the 30 min before the I-V curve begins;
 - DNI fluctuates less than 10 % between maximum and minimum values for the 10 min before the I-V curve begins;
 - ambient temperature changes by no more than 5 °C in the 30 min before the I-V curve begins.
- b) Retain only I-V data which meet the following conditions:
 - DNI is greater than 700 W/m²;
 - DNI to GNI ratio >0,8;
 - 5 minute average wind speed is between 0,5 m/s and 5 m/s;
 - DNI fluctuates by less than ±1 % before and after the I-V curve sweep;
 - SMR(1,2), SMR(1,3) and SMR(2,3) are limited to a range of no more than 20 %. Tighter range can be used to improve fitting but this is often a trade-off as it may improve fit results but can reduce the range of ambient temperatures for which data remains;
 - instantaneous pointing error recorded at the time of the I-V sweep shall be less than the 98 % half acceptance angle, see Clause 3, and less than 0,2°.

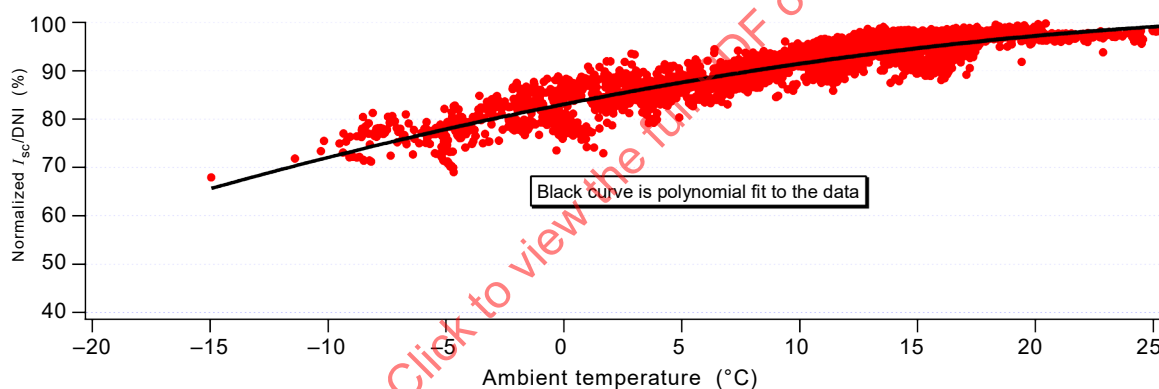
Plot I_{sc}/DNI against lens temperature or ambient temperature and determine a linear or polynomial fit for the data as applicable. Figure 9 is an example of normalized I_{sc}/DNI plotted against ambient temperature with no filtering on SMR. The data are color coded with SMR because I_{sc}/DNI is also dependent on SMR.



IEC

Figure 9 – Raw data for extracting the impact of lens temperature

As spectral conditions change (indicated by SMR) I_{sc}/DNI also changes and hence the above SMR filtering requirements. Figure 9 is color coded for SMR(1,2) ranging from 0,85 to 1,05 but additional data below 0,85 is shown in black. If the black data is included the fit will be poor. Figure 10 shows a polynomial fit after the black data has been excluded.



IEC

Figure 10 – Filtered data for extracting impact of lens temperature

A polynomial fit has been used in this case because it is known that this DUT has flat lens temperature performance in the range of 20 °C to 40 °C and a linear fit would be misleading. Generally CPV DUTs have lens performance that shows a parabolic shape with a flat performance region around designed operating temperature but performance drops off at extreme high and low temperatures. For the DUT in Figure 10 it is clear that performance begins to drop somewhere below 10 °C to 15 °C but other module designs can result in this drop off not occurring until temperatures below 0 °C. Again for these reasons lens temperature performance should not be extrapolated outside the region of data collection.

9.10.3 Reporting

The report on lens temperature performance should include the following:

- 1) documentation of all filtering used prior to plotting I_{sc}/DNI versus lens temperature or ambient temperature;
- 2) pictures of lens temperature measurement location;
- 3) the plotted data and the resulting fit equation;
- 4) statement of the range of ambient temperatures for which the fit is applicable.

9.11 Indoor lens temperature performance test

9.11.1 General guidance

Indoor lens performance testing is based on the assumption that the DUT lens can be uniformly heated or cooled while maintaining relatively stable cell temperature. DUT I-V curves are then measured under a collimated light simulator at fixed irradiance and spectral conditions for the various lens temperatures. One challenge with this assumption is that the cell temperature will be changed through heat transfer through the air cavity or other medium between the lens and the cells. Another challenge is that it is difficult to maintain and document uniform lens temperature. The test recommendations as described take into account current best practices for meeting the above assumptions but without careful adherence to details the assumptions will not be achieved. If the cell temperature varies during the test voltage corrections can be made to the MPP but it is ideal to avoid said variations and corrections. On the other hand if measurements indicate that lens temperature has a nonuniformity greater than 3 °C the test results should be discarded. Nonuniformity in lens temperature can result in significant mismatch between the performance of the individual cells and this can significantly impact the results.

9.11.2 Procedure

One possible set of steps for measuring indoor lens temperature performance.

- 1) Mount and align the DUT in the test plane of the collimated solar simulator for measuring I-V curves per 9.5 (Indoor I-V measurements)
- 2) Attach at least 4 lens temperature sensors equally spaced around the edges of the lens aperture while still on the material from which the lenses are fabricated (for example if the lenses are silicone-on-glass but the DUT frame is aluminum, the sensors should be attached to the glass). The lens temperature sensors do NOT need a foil or other protective shield from irradiance as is necessary outdoors.
- 3) Mount at least 2 DUT sensors on the backplane as near to cell locations as possible. One of the sensors should be located in the center region of the DUT while the second sensor should be near the edge of the DUT.
- 4) Align and focus an infrared camera on the DUT lens while ensuring the camera is outside the path of the simulator light source (the infrared camera is used for a relative comparison of the uniformity of the lens temperature and not for absolute lens temperature measurements).
- 5) Measure a baseline I-V curve with the lens at room temperature.
- 6) Secure a heating or cooling device to the lens surface (silicone heating pads have been effectively used). Note that it is critical that the temperature control device creates even heating or cooling of the lens. In the case of a silicone heating pad, applying the pad with even clamping pressure has provided sufficient heating uniformity. Note that the process of clamping a heating pad to lens as well as its eventual removal for I-V curve measurements should not influence DUT alignment. The DUT alignment should be completed and validated when the entire DUT is at room temperature. Confirmation that alignment has not been significantly altered during the test is confirmed by comparing the baseline measurement with a measurement after the DUT returns to room temperature.
- 7) Time synchronize the data acquisition which is measuring lens and DUT temperature with the data acquisition which measures the I-V curves and irradiance.
- 8) While measuring lens and DUT temperatures heat the lens to at least 55 °C. It is desirable to heat the lens and remove the temperature control device in as short of time period as possible. Excessive time periods are more likely to result in significantly heating of the cells as measured through DUT temperature sensor.
- 9) Quickly remove the temperature control device and begin measuring I-V curves, while recording infrared pictures of the lens and the DUT and lens temperature sensors.
- 10) The uniformity of the lens temperature as measured by the infrared camera and the lens temperature sensors should be monitored as the lens is cooling and I-V curves are being measured. The uniformity should be maintained within 3 °C. A heat gun or other device

can be used to help maintain uniformity of the lens temperature as it cools between I-V curves. Typically the edges of the lenses will cool faster than the center and therefore the heat gun can be used to moderate this effect.

- 11) Record I-V curves at a periodic interval until the lenses achieve room temperature. A one min interval is typically sufficient but the necessary recording interval is dependent on the indoor test conditions and on verification of sufficiently uniform lens temperature.
- 12) If a cooling device is available repeat the above process by cooling the lens to at least 0 °C and then measuring I-V curves as the DUT heats to room temperature.

9.11.3 Reporting

The report on lens temperature performance per indoor measurements should include the following:

- 1) documentation of the irradiance and spectral conditions achieved per simulator measurements;
- 2) pictures of lens temperature and DUT temperature measurement locations;
- 3) infrared images of the lens during the test;
- 4) plots of MPP, FF, I_{sc} , and V_{oc} verses the average of the lens temperature sensors corresponding with each I-V measurement;
- 5) documentation of any corrections applied due to DUT cell cooling or heating that occurred during the test.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

Bibliography

IEC 60904-5, *Photovoltaic devices – Part 5: Determination of equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method*

IEC 60904-9-1, *Photovoltaic devices – Part 9-1: Collimated beam solar simulator performance requirements*⁵

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

⁵ Under consideration.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	45
1 Domaine d'application	47
2 Références normatives	47
3 Concepts	48
4 Echantillonnage	51
5 Marquage du DUT et informations associées	51
5.1 Marquage indélébile	51
5.2 Informations préliminaires mentionnées par le fabricant	52
6 Essais	52
7 Rapport	53
8 Exigences concernant les équipements normalisés	54
8.1 Appareil de mesure de l'éclairement	54
8.1.1 Pyrhéliomètre sous incidence normale (NIP)	54
8.1.2 Pyranomètre à éclairement normal global	54
8.1.3 Dispositif de mesure spectrale	54
8.1.4 Cellules de référence composantes	55
8.1.5 Capteur d'éclairement de référence à l'intérieur	55
8.1.6 Capteur d'éclairement auxiliaire	56
8.2 Simulateur solaire	56
8.2.1 Exigences générales	56
8.2.2 Simulateur de lumière continue	56
8.2.3 Simulateur à impulsion de détente simple	57
8.2.4 Simulateur à impulsion de détente multiple	57
8.3 Suiveur solaire ou système de montage du DUT	57
8.3.1 Généralités	57
8.3.2 Capteur d'erreur de pointage	57
8.4 Mesurage et contrôle de la température	57
8.4.1 Capteur de température du DUT	57
8.4.2 Capteur de température ambiante	58
8.4.3 Capteur de température de la lentille ou de l'optique	58
8.4.4 Système de contrôle de température	58
8.5 Mesurage du courant/de la tension	58
8.6 Anémomètre	59
8.7 Charge électrique	59
9 Procédures d'essai	59
9.1 Mesurage des coefficients de température du DUT	59
9.1.1 Objectif	59
9.1.2 Appareillage	59
9.1.3 Procédure de collecte des données et exigences relatives aux données	59
9.1.4 Détermination des coefficients de température	63
9.2 Valeur V_{OC} de référence du DUT (dans des conditions d'éclairement de 900 W/m^2 et à une température des cellules de 25 °C)	64
9.2.1 Généralités	64
9.2.2 Procédure de mesure des courbes I-V d'obscurité pour la détermination de la valeur V_{OC} de référence	64
9.2.3 Valeur V_{OC} de référence avec un simulateur solaire	66

9.3	Calcul de la température moyenne des cellules du DUT	66
9.3.1	Objet	66
9.3.2	Procédure.....	66
9.4	Étalonnage du capteur d'éclairement de référence et détermination de la valeur I_{SC} de référence.	67
9.4.1	Objet	67
9.4.2	Exigences relatives aux données.....	67
9.4.3	Détermination de la valeur I_{SC} étalonnée de référence, ($I_{SC, cal}$ et I_{SC})	67
9.4.4	Exigence d'étalonnage.....	69
9.5	Mesurages I-V à l'intérieur d'un DUT à concentrateur photovoltaïque.....	69
9.5.1	Objet	69
9.5.2	Exigences générales concernant les mesures.....	69
9.5.3	Procédure d'alignement du DUT à l'intérieur.....	70
9.5.4	Procédure pour les simulateurs solaires à impulsion de détente simple	70
9.5.5	Procédure pour les simulateurs solaires à impulsion de détente multiple	71
9.6	Mesurages I-V à l'extérieur d'un DUT à concentrateur photovoltaïque.....	71
9.6.1	Objet	71
9.6.2	Appareillage	71
9.6.3	Procédure.....	71
9.6.4	Rapport	72
9.7	Rapports de puissance dans des conditions CSOC et CSTC.....	73
9.7.1	Exigences concernant le filtrage des données pour une conversion CSOC ou CSTC.....	73
9.7.2	Détermination de la puissance dans des conditions CSOC	74
9.7.3	Détermination de la puissance dans des conditions CSTC.....	74
9.8	Procédure d'alignement du DUT et mesure de la sensibilité de désalignement	76
9.8.1	Objet	76
9.8.2	Appareillage	76
9.8.3	Recommandations concernant le montage initial du DUT.....	76
9.8.4	Exigences générales	76
9.8.5	Balayages excentrés individuels et alignement final du DUT.....	77
9.8.6	Autre procédure d'établissement de graphique elliptique pour la consignation de la sensibilité de désalignement dans le rapport d'essai.....	78
9.8.7	Rapport d'essai	78
9.9	Montage et alignement du capteur d'erreur de pointage et autres appareils sensibles à l'alignement.....	78
9.9.1	Objet	78
9.9.2	Procédure.....	79
9.10	Essai de performances à la température de la lentille à l'extérieur	79
9.10.1	Guide général.....	79
9.10.2	Procédure.....	80
9.10.3	Rapport d'essai	82
9.11	Essai de performances à la température de la lentille à l'intérieur	82
9.11.1	Guide général.....	82
9.11.2	Procédure.....	82
9.11.3	Rapport d'essai	83
	Bibliographie.....	85

Figure 2 – Erreur de pointage d'un suiveur solaire	50
Figure 3 – Exemple de données relatives à l'angle d'admission pour un DUT à concentrateur photovoltaïque.....	51
Figure 4 – Organigramme des essais de performances applicables au DUT	53
Figure 5 – Données V_{OC} après le retrait du revêtement.....	62
Figure 6 – Figure 5 reprise après suppression d'un point de donnée.....	63
Figure 7 – La dérivée des données I-V d'obscurité tracée pour déterminer R_S	65
Figure 8 – Approche itérative pour établir L_{SC} et V_{OC}	68
Figure 9 – Données brutes permettant d'extraire l'influence de la température de la lentille.....	81
Figure 10 – Données filtrées permettant d'extraire l'influence de la température de la lentille.....	81
Tableau 1 – Exigences relatives au rapport SMR pour les mesurages à l'intérieur	70

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CONCENTRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES (CPV) –
ESSAI DE PERFORMANCES –****Partie 3: Mesurages de performances et rapport de puissance****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. A 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 62670-3 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 internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/1204/FDIS	82/1233/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.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62670, publiées sous le titre général *Concentrateurs photovoltaïques (CPV) – Essai de performances*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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 "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62670-3:2017

CONCENTRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES (CPV) – ESSAI DE PERFORMANCES –

Partie 3: Mesurages de performances et rapport de puissance

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62670 spécifie des procédures de mesure et des instruments permettant d'établir les performances des concentrateurs photovoltaïques dans des conditions de fonctionnement normales du concentrateur (CSOC) et des conditions d'essais normales du concentrateur (CSTC) définies dans l'IEC 62670-1, y compris les rapports de puissance.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. 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 60891, *Dispositifs photovoltaïques – Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V mesurées*

IEC 60904-2, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 2: Exigences applicables aux dispositifs photovoltaïques de référence*

IEC 60904-3, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 3: Principes de mesure des dispositifs solaires photovoltaïques (PV) à usage terrestre incluant les données de l'éclairement spectral de référence*

IEC 60904-4:2009, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 4: Dispositifs solaires de référence – Procédures pour établir la traçabilité de l'étalonnage*

IEC 60904-10, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 10: Méthodes de mesure de la linéarité*

IEC 62670-1, *Concentrateurs photovoltaïques (CPV) – Essai de performances – Partie 1: Conditions normales*

IEC 62817:2014, *Systèmes photovoltaïques – Qualification de conception des suiveurs solaires*

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

ISO 2859-1, *Règles d'échantillonnage pour les contrôles par attributs – Partie 1: Procédures d'échantillonnage pour les contrôles lot par lot, indexés d'après le niveau de qualité acceptable (NQA)*

ISO 9060:1990, *Énergie solaire – Spécification et classification des instruments de mesurage du rayonnement solaire hémisphérique et direct*

3 Concepts

Les concepts suivants sont utilisés dans le présent document.

- a) CSOC – conditions normales de fonctionnement du concentrateur conformément à l'IEC 62670-1 (rayonnement direct normal (*direct normal irradiance* en anglais – DNI) 900 W/m², température ambiante de 20 °C, vitesse du vent égale à 2 m/s, spectre AM1.5D conforme à l'IEC 60904-3).
- b) CSTC – conditions d'essais normales du concentrateur conformément à l'IEC 62670-1 (DNI 1 000 W/m², température des cellules égale à 25 °C, spectre AM1.5D conforme à l'IEC 60904-3).
- c) SMR – rapport d'égalisation spectrale (*spectral matching ratio* en anglais),

$$SMR(i,j) = \frac{I_i/I_j}{I_{i,ref}/I_{j,ref}} \text{ où } I_i \text{ et } I_j \text{ représentent le courant de court-circuit ou les densités}$$

de courant de court-circuit dans des conditions spectrales dominantes selon les sous-cellules distinctes i et j dans la cellule solaire multijonction. $I_{i,ref}$ et $I_{j,ref}$ représentent les courants de court-circuit/densités de courant de court-circuit associés avec le spectre direct AM 1.5 défini par l'IEC 60904-3. Un nombre est attribué aux sous-cellules selon le classement de leur énergie de bande interdite (E_g), le nombre 1 correspondant à l'énergie E_g la plus élevée et le nombre n correspondant à l'énergie E_g la plus basse. Ainsi, une cellule solaire multijonction avec n sous-cellules distinctes comporte des valeurs SMR uniques $(n^2-n)/2$. Par exemple, pour $n = 3$ (dispositif à triple jonction), ces valeurs sont SMR(1,2), SMR(1,3) et SMR(2,3). Pour une cellule à triple jonction avec accord de réseau: GaInP correspond à la jonction 1, GaInAs correspond à la jonction 2 et Ge correspond à la jonction 3.

Le rapport SMR appliqué aux courbes I-V externes ne signifie PAS que les sorties des sous-cellules sont adaptées au DUT, mais en revanche à un ensemble plus générique de sous-cellules qui permet au laboratoire d'essai de définir les écarts du spectre externe dominant par rapport au spectre AM1.5D de référence. La vapeur d'eau précipitable, les aérosols et la masse d'air constituant les variables dominantes à l'origine des modifications du spectre externe, une adaptation spécifique au DUT n'est pas exigée. Il a été démontré qu'un filtrage établi sur les mesurages effectués sur trois sous-bandes du spectre permet de réduire le plus possible la variation de performances du DUT à concentrateur photovoltaïque. Il est possible d'utiliser les cellules de référence composantes (8.1.4) pour déterminer les valeurs SMR ou le rapport SMR peut être calculé avec le spectre dominant. Dans ce cas, les valeurs I_1 , I_2 et I_3 sont généralement définies comme l'éclairement normal direct dans les sous-bandes comprises entre 370 nm et 650 nm, 650 nm et 870 nm et 870 nm et 1 650 nm respectivement. Ces valeurs ainsi définies équivalent à un ensemble de cellules de référence composantes dont les rendements quantiques externes (EQE ou *external quantum efficiencies* en anglais) sont de 100 % dans les bandes définies.

Le rapport SMR appliqué aux courbes I-V internes se rapporte EFFECTIVEMENT aux sorties des sous-cellules adaptées au DUT. Les mesurages à l'intérieur se rapportent spécifiquement aux sous-cellules d'adaptation étant donné que l'écart de la forme du spectre par rapport à la forme caractéristique du spectre externe est avéré dans des conditions de simulation de la lumière solaire. Par conséquent, trois sous-bandes ne permettent pas toujours de réduire le plus possible la variation de performances du DUT à concentrateur photovoltaïque. Les cellules de référence composantes spécifiques au dispositif permettent de déterminer le rapport SMR. Ce rapport peut également être calculé à partir du spectre mesuré et des réponses spectrales des cellules de référence composantes spécifiques au dispositif.

- d) Croisement séparé de rapports SMR – événement constitutif des mesurages de données extérieures pour lequel la valeur SMR fournie se situe dans les limites définies proches de l'unité. Une heure (au moins) sépare cet événement des autres événements, pour lequel la valeur SMR se situe dans les limites définies proches de l'unité.
- e) MPP (*maximum power point* en anglais) – point de puissance maximale globale d'une courbe I-V.

- f) V_{mp} – tension au point MPP.
- g) I_{mp} – courant au point MPP.
- h) DNI (*direct normal irradiance* en anglais) – éclairement normal direct.
- i) GNI (*global normal irradiance* en anglais) – éclairement normal global.
- j) η – rendement du DUT au MPP pour une courbe I-V individuelle.
- k) DUT (*device under test* en anglais) – dispositif en essai.
- l) Entrée –surface d'entrée du DUT, mesurée entre les bords intérieurs du châssis du DUT. En l'absence de transition claire entre la lentille et le châssis, il est possible d'appliquer un ruban opaque afin de masquer le bord de la surface de la lentille et d'identifier le bord de la surface d'entrée. Cette opération doit être achevée préalablement à la collecte des courbes I-V. D'autres méthodes peuvent être envisagées si cette méthode ne peut être appliquée au DUT. Le rapport d'essai doit documenter la procédure d'identification de la surface d'entrée.
- m) Demi-angle d'ouverture – demi-angle d'un dispositif comportant un tube collimateur, défini comme l'arc-tangente (R/L) selon la Figure 1.
- n) Champ de vision ou angle complet d'ouverture – angle équivalent au double du demi-angle d'ouverture.
- o) Angle de pente – angle d'un dispositif comportant un tube collimateur, défini comme l'arc-tangente $[(R-r)/L]$ selon la Figure 1.
- p) Angle limite – angle d'un dispositif comportant un tube collimateur, défini comme l'arc-tangente $[(R+r)/L]$ selon la Figure 1.
- q) Erreur de pointage sur l'axe principal et l'axe secondaire –angle mesuré entre le vecteur de pointage du suiveur et le vecteur de pointage du soleil (voir Figure 2) [adopté de l'IEC 62817:2014, 7.2]. Généralement, le capteur qui permet de mesurer l'erreur de pointage définit le vecteur de pointage du suiveur. Le plan du capteur réagit au rayonnement direct du soleil. Le vecteur perpendiculaire à ce plan de mesure est, par conséquent, représentatif du vecteur de pointage du suiveur ou du vecteur de pointage du DUT. Bien que l'erreur de pointage définie soit un écart angulaire simple, le capteur la mesure selon deux angles distincts par rapport au plan de référence

$$\text{erreur de pointage} = \sqrt{\text{erreur de pointage sur l'axe principal}^2 + \text{erreur de pointage sur l'axe secondaire}^2}$$

Dans le présent document, l'équation ci-dessus définit les erreurs de pointage sur l'axe principal et l'axe secondaire. Toutefois, le plan du DUT étant également censé être aligné sur la position du capteur d'erreur de pointage, l'axe principal et l'axe secondaire sont également représentatifs pour le DUT.

- r) Angle d'admission – angle complet minimum permettant la rotation du DUT (par rapport au soleil), celui-ci continuant de générer 90 % de sa puissance maximale normalisée DNI. Bien que l'identification complète de l'angle d'admission nécessite un graphique bidimensionnel, l'angle d'admission défini dans le présent document fait référence à l'angle complet minimum issu des balayages de mesure angulaires limités à l'axe principal et à l'axe secondaire du DUT (voir 9.8.5). Par exemple, le DUT décrit à la présente Figure 3 les résultats des mesures de l'angle d'admission ($0,75^\circ$ pour l'axe principal et $0,7^\circ$ pour l'axe secondaire). Par conséquent, l'angle d'admission pour ce DUT est de $0,7^\circ$. Il convient de noter que la Figure 3 représente les résultats de mesure symétriques au voisinage du point zéro (angle d'incidence normal), mais les résultats associés à un DUT peuvent être asymétriques.
- s) Demi-angle d'admission – angle défini comme l'angle d'admission spécifié ci-dessus divisé par deux. Cette définition permet un meilleur filtrage des restrictions concernant l'erreur de pointage, spécifiées ultérieurement dans le présent document. La définition est conservée à des fins de simplicité bien que l'asymétrie au voisinage de l'angle d'incidence nul ne soit pas conforme à cette définition du demi-angle.
- t) Angle d'admission à 98 % et demi-angle d'admission à 98 % – les définitions de l'angle d'admission et du demi-angle d'admission mentionnées ci-dessus s'appliquent, avec cette exception qui veut que lorsque les termes sont suivis de l'expression "à 98 %", ils se

rapportent désormais à l'angle complet et au demi-angle de rotation possible du DUT. Cette rotation s'effectue tout en continuant à générer 98 % de la puissance maximale normalisée DNI du DUT (et non la puissance d'origine de 90 %). Par exemple, le DUT décrit à la Figure 3 présente un angle d'admission à 98 % de $0,32^\circ$ et un mesurage de demi-angle à 98 % de $0,16^\circ$.

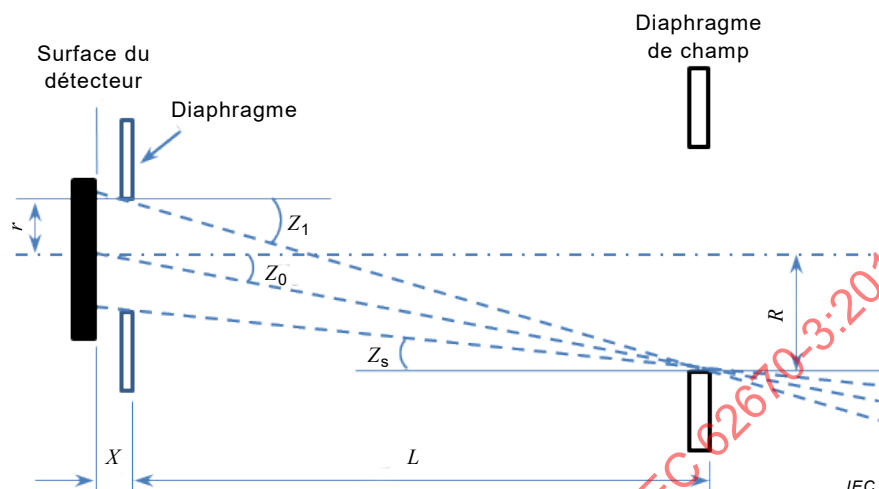


Figure 1 – Géométrie d'un tube collimateur

Dans la Figure 1, le diaphragme de champ, de rayon R , représente le point d'entrée limite de la lumière dans le tube collimateur. Le diaphragme, de rayon r , représente une limitation supplémentaire de la lumière qui peut atteindre le détecteur. L est la distance entre la partie frontale du diaphragme de champ et le diaphragme. La distance, X , entre le diaphragme et le détecteur est censée être réduite et négligeable.

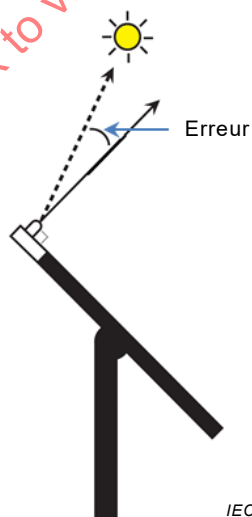


Figure 2 – Erreur de pointage d'un suiveur solaire

L'IEC 62817 définit l'erreur de pointage d'un suiveur solaire comme l'angle mesuré entre le vecteur de pointage du suiveur et le vecteur des rayons solaires. Comme le représente la figure, le vecteur de pointage du suiveur est le vecteur perpendiculaire au plan du capteur qui mesure l'erreur de pointage.

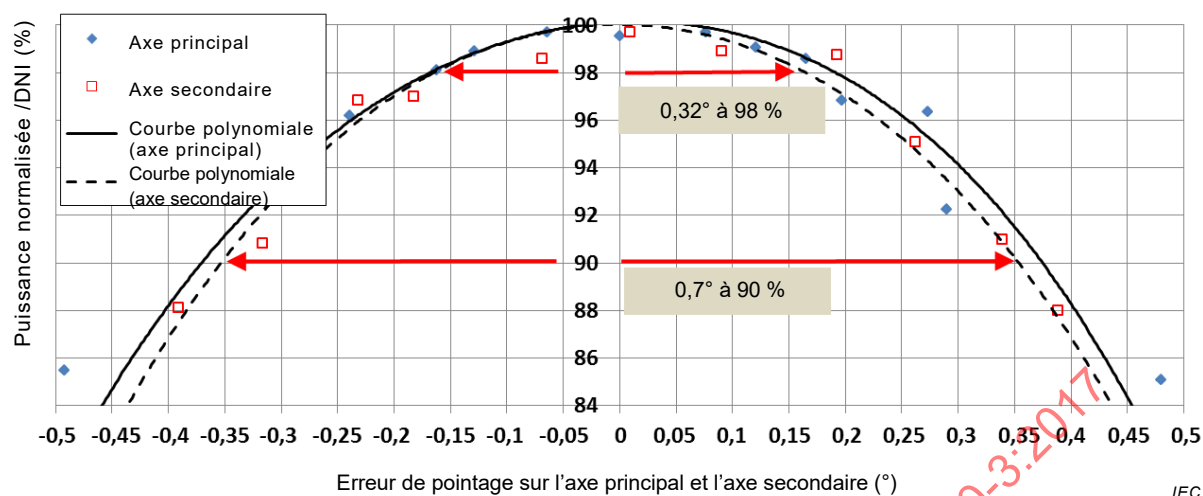


Figure 3 – Exemple de données relatives à l'angle d'admission pour un DUT à concentrateur photovoltaïque

Dans la Figure 3, l'angle d'admission de l'axe secondaire est légèrement moins important que l'angle d'admission de l'axe principal, et il est par conséquent utilisé pour la consignation des résultats dans le rapport d'essai. Le DUT a un angle d'admission de 0,7° (demi-angle d'admission de 0,35°) et un angle d'admission à 98 % de 0,32° (demi-angle d'admission à 98 % de 0,16°).

4 Echantillonnage

Trois éprouvettes doivent être prélevées de manière aléatoire dans un ou plusieurs lots de production conformément à la règle fournie dans l'ISO 2859-1, pour les essais de qualification de performances. L'échantillonnage ne doit pas s'appliquer pour les mesurages des dispositifs prototypes qui ne sont pas des dispositifs de production. Le rapport d'essai doit mentionner ces informations.

Lorsque l'assignation des caractéristiques d'une plaque signalétique utilise les résultats d'essai, les modules ou ensembles, désignés ci-après comme dispositif en essai (DUT ou *device under test* en anglais), doivent être fabriqués à partir de matériaux et de composants spécifiques conformément aux plans et fiches de procédé appropriés, et doivent avoir fait l'objet des procédures normales d'inspection, de contrôle de la qualité et de réception en production mises en place par le fabricant. Le DUT, qui doit être totalement assemblé, doit être fourni avec les instructions de maintenance et de montage final du fabricant concernant les recommandations d'installation des diodes, châssis, consoles, etc.

5 Marquage du DUT et informations associées

5.1 Marquage indélébile

Chaque DUT doit porter les marquages clairs et indélébiles suivants:

- le nom, le monogramme ou le symbole du fabricant;
- le numéro de type ou de modèle;
- le numéro de série;
- la polarité des bornes ou des conducteurs (un codage couleur est admissible);
- le marquage de la date et du lieu de fabrication doit être apposé sur le DUT ou le numéro de série doit permettre la traçabilité de ces informations.

5.2 Informations préliminaires mentionnées par le fabricant

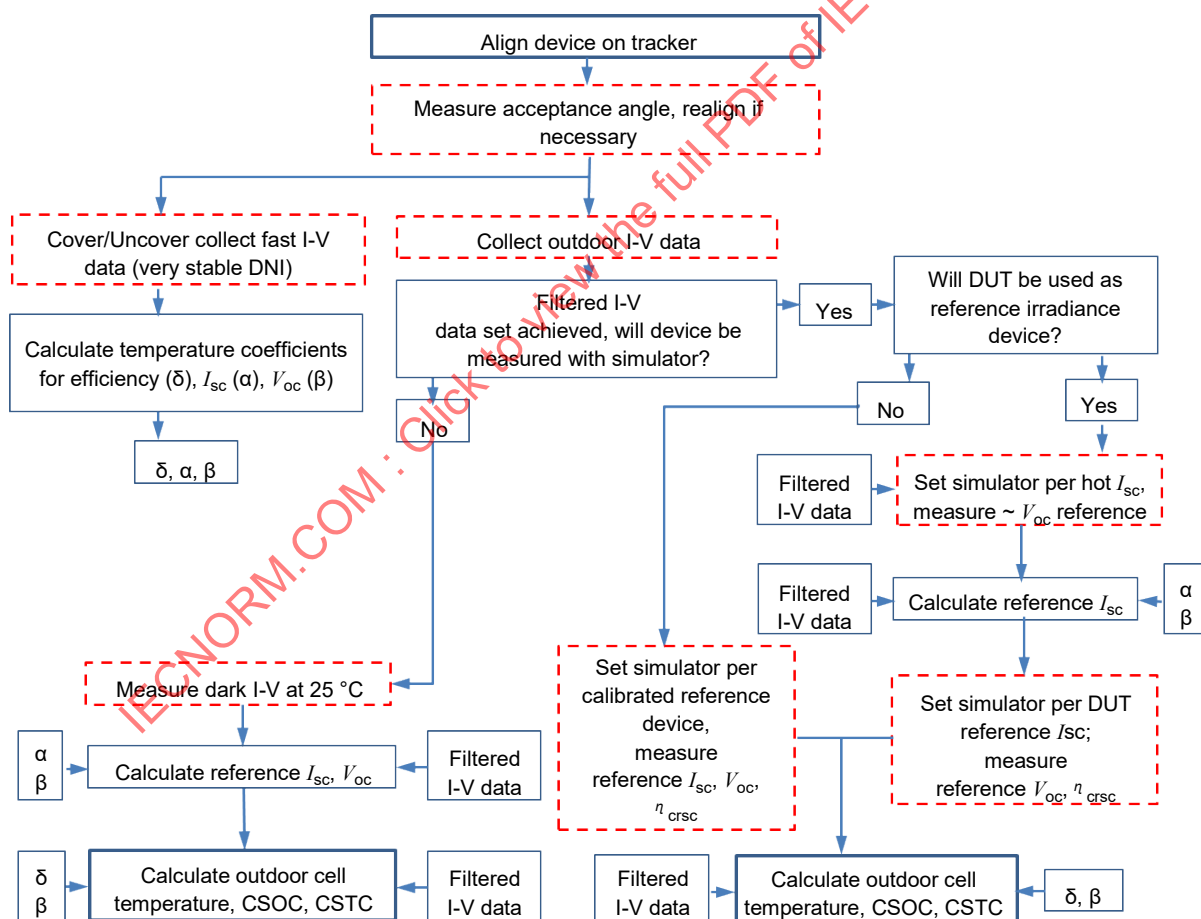
Le fabricant doit fournir au laboratoire d'essai des valeurs indicatives pour le montage de mesure:

- les valeurs des points de puissance maximale (MPP), V_{oc} et I_{sc} prévues dans des conditions CSOC;
- l'angle d'admission;
- les instructions d'installation.

6 Essais

Le DUT doit être soumis à la procédure de mesure des performances dans des conditions d'éclairement et de température spécifiées à l'Article 9. La personne en charge de la réalisation des essais doit, le cas échéant, respecter les instructions de maintenance, de montage et de connexion du fabricant.

Les essais auxquels est soumis le DUT doivent observer la séquence d'essai définie à la Figure 4.



IEC

Anglais	Français
Align device on tracker	Aligner le dispositif sur le suiveur
Measure acceptance angle, realign if necessary	Mesurer l'angle d'admission, réaligner si nécessaire
Cover/Uncover collect fast I-V data (very stable DNI)	Concerne/ne concerne pas une collecte rapide des données I-V (DNI très stable)

Anglais	Français
Calculate temperature coefficients for efficiency (δ), I_{sc} (α), V_{oc} (β)	Calculer les coefficients de température de rendement (δ), I_{sc} (α), V_{oc} (β)
Collect outdoor I-V data	Collecter les données I-V extérieures
Filtered I-V data set achieved, will device be measured with simulator?	Ensemble de données I-V filtrées; Le simulateur sert-il à mesurer le dispositif ?
No	Non
Yes	Oui
Will DUT be used as reference irradiance device?	Le DUT est-il utilisé comme dispositif d'éclairement de référence?
Filtered I-V data	Données I-V filtrées
Set simulator per hot I_{sc} , measure $\sim V_{oc}$ reference	Régler le simulateur selon le courant chaud I_{sc} , mesurer la valeur de référence $\sim V_{oc}$
Calculate reference I_{sc}	Calculer la valeur I_{sc} de référence
Measure dark I-V at 25 °C	Mesurer les courbes I-V d'obscurité à une température de 25 °C
Calculate reference I_{sc} , V_{oc}	Calculer les valeurs I_{sc} , V_{oc} de référence
Set simulator per calibrated reference device, measure reference I_{sc} , V_{oc} , η_{CSTC}	Régler le simulateur selon le dispositif de référence étalonné; mesurer les valeurs I_{sc} , V_{oc} , η_{CSTC} de référence
Set simulator per DUT reference I_{sc} ; measure reference V_{oc} , η_{CSTC}	Régler le simulateur selon la valeur I_{sc} de référence du DUT; mesurer les valeurs V_{oc} , η_{CSTC} de référence
Calculate outdoor cell temperature, CSOC, CSTC	Calculer la température des cellules à l'extérieur, CSOC, CSTC

NOTE L'organigramme comporte des cadres discontinus qui désignent des mesurages réels et des cadres pleins qui désignent des calculs ou des décisions.

Figure 4 – Organigramme des essais de performances applicables au DUT

7 Rapport

Après réalisation de la procédure, le laboratoire d'essai doit établir un rapport certifié des essais de performances, contenant les caractéristiques de puissance mesurées, conformément aux procédures de l'ISO IEC 17025. Chaque certificat ou rapport d'essai doit fournir au moins les informations suivantes.

- un titre;
- le nom et l'adresse du laboratoire d'essai et l'emplacement (y compris la latitude, la longitude et l'altitude dans le cas de mesurages à l'extérieur) de réalisation de l'étalonnage ou des essais;
- l'identification unique de la certification ou du rapport et de chacune des pages;
- le nom et l'adresse du client, le cas échéant;
- la description et l'identification du dispositif étalonné ou soumis à l'essai;
- la caractérisation et l'état du dispositif étalonné ou en essai;
- la date de réception du dispositif en essai, la ou les dates d'étalonnage et les dates et heures des essais à l'extérieur, le cas échéant;
- l'identification de la méthode d'étalonnage ou d'essai employée;
- la référence à la procédure d'échantillonnage, le cas échéant;
- tout écart, tout ajout ou toute exclusion par rapport à la méthode d'étalonnage ou d'essai et toutes les autres informations se rapportant à un étalonnage ou un essai spécifique, par exemple les conditions d'environnement;

- k) les mesurages, les examens et les résultats dérivés comprennent au minimum les éléments suivants: un histogramme de tous les points de données CSOC et de la puissance moyenne dans des conditions CSOC, la puissance moyenne dans des conditions CSTC (intégrer un histogramme de tous les points de données convertis lorsque des données extérieures permettent d'établir des conditions CSTC), les coefficients de température du DUT et les valeurs V_{oc} et I_{sc} de référence utilisées dans les calculs de température des cellules;
- l) une indication de l'incertitude estimée des résultats d'essai;
- m) une indication précisant si les puissances dans des conditions CSOC mesurées sont conformes aux valeurs spécifiées par le fabricant dans les limites d'incertitude de mesure du laboratoire d'essai (le cas échéant);
- n) une signature et la fonction, ou une identification équivalente de la ou des personnes responsables du contenu du certificat ou du rapport, et la date d'édition;
- o) le cas échéant, une indication précisant que les résultats se rapportent uniquement aux dispositifs étalonnés ou soumis à l'essai;
- p) une déclaration indiquant que le certificat ou le rapport ne doit pas être reproduit sauf dans sa totalité, sans l'accord écrit du laboratoire;
- q) l'identification du suiveur utilisé, le capteur d'erreur de pointage du suiveur y compris les données et la date d'étalonnage du capteur, ainsi que la caractérisation documentée de l'exactitude du suiveur, conformément à l'Article 7 de l'IEC 62817:2014;
- r) l'identification, l'emplacement et l'étalonnage du capteur de vent utilisé;
- s) l'identification et l'étalonnage du pyréliomètre sous incidence normale (NIP ou *normal incidence pyrhelimeter* en anglais) utilisé;
- t) l'identification et l'étalonnage des capteurs de courant et de tension utilisés;
- u) l'identification de la méthode d'alignement du DUT employée;
- v) l'identification de la distance entre le NIP et le DUT;
- w) l'identification et l'étalonnage des cellules de référence composantes utilisées ou du spectroradiomètre employé;
- x) l'identification des dates de nettoyage du DUT, du NIP et des cellules de référence composantes le cas échéant;
- y) une indication de l'identification de la superficie d'entrée.

Le fabricant doit conserver un exemplaire de ce rapport pour référence.

8 Exigences concernant les équipements normalisés

8.1 Appareil de mesure de l'éclairement

8.1.1 Pyréliomètre sous incidence normale (NIP)

Les mesurages DNI doivent être effectués à l'aide d'un pyréliomètre sous incidence normale de première catégorie conformément à l'ISO 9060:1990. Le dispositif de référence doit permettre d'effectuer des mesurages linéaires comme le définit l'IEC 60904-10 sur la plage d'éclairement concernée.

8.1.2 Pyranomètre à éclairement normal global

Les mesurages GNI doivent être effectués à l'aide d'un dispositif de référence photovoltaïque conditionné et étalonné conformément à l'IEC 60904-2, ou à l'aide d'un pyranomètre.

8.1.3 Dispositif de mesure spectrale

Ce dispositif doit être capable, pour les mesurages à l'extérieur, d'identifier l'éclairement spectral normal direct au moins dans les trois plages de longueurs d'ondes distinctes

nécessaires pour déterminer les valeurs SMR définies par le point c) de l'Article 3. Le dispositif de mesure spectrale doit être capable, pour les mesurages par simulateur, d'identifier l'éclairement spectral normal direct dans les plages de longueurs d'ondes distinctes correspondant aux sous-cellules dans le DUT. Le dispositif doit comporter des tubes collimateurs de sorte que l'angle complet d'ouverture soit de 5°, et l'angle de pente soit de 1°. Le dispositif doit être étalonné comme dispositif de référence principal ou secondaire et sa traçabilité doit être conforme aux 3.3, 3.4 et 3.5 respectivement de l'IEC 60904-4:2009. L'étalonnage doit être au moins annuel. Le dispositif de mesure spectrale peut être un spectroradiomètre, des cellules de référence composantes définies en 8.1.4 ou un autre instrument approprié. L'incertitude des valeurs SMR produites doit être documentée. Pour les mesurages à l'intérieur, la superficie d'essai désignée du faisceau de simulation solaire doit comprendre également la superficie d'entrée de ce dispositif de mesure spectrale.

8.1.4 Cellules de référence composantes

8.1.4.1 Généralités

Il s'agit d'un ensemble de dispositifs qui, associés, peuvent être utilisés comme dispositif de mesure spectrale pour le présent document. Les mesurages à l'extérieur de l'éclairement spectral exigent trois cellules/jonctions distinctes au minimum.

8.1.4.2 Cellules de référence composantes normalisées

Ensemble de cellules de référence composantes constituant un dispositif de mesure spectrale à l'extérieur acceptable, indépendamment du DUT. L'ensemble normalisé de cellules de référence composantes doit être équivalent aux jonctions individuelles d'une cellule à triple jonction avec accord de réseau dont les bandes interdites sont de 1,9 eV, 1,4 eV et 0,7 eV. Les cellules composantes d'une cellule GaInP/GaInAs/Ge à triple jonction avec accord de réseau classique sont censées satisfaire à ces exigences.

NOTE Cet ensemble normalisé de cellules de référence composantes n'est pas destiné à être particulièrement adapté aux sous-cellules du DUT ou au courant produit par chacune des sous-cellules du DUT. Les cellules de référence composantes normalisées, bien que non spécifiques au DUT, permettent de filtrer les données extérieures qui limitent la variation spectrale et réduisent le plus possible l'incertitude de performances consignée dans des conditions CSOC et CSTC (données issues des données I-V extérieures).

8.1.4.3 Cellules de référence composantes adaptées au DUT

Les cellules de référence composantes particulièrement adaptées au DUT peuvent fournir des informations plus complètes concernant l'adaptation actuelle des sous-cellules du DUT et peuvent être utilisées comme dispositif de mesure spectrale tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Les cellules de référence composantes à adaptation spécifique peuvent, avec un nombre suffisant de données d'essai, générer des critères de filtrage SMR qui réduisent l'incertitude des caractéristiques assignées dans des conditions CSOC et CSTC. Il est admis que le laboratoire d'essai utilise des cellules de référence composantes adaptées au DUT si les informations suivantes sont vraies:

- a) les cellules composantes satisfont à toutes les exigences du 8.1.3;
- b) la conception, les matériaux et le fabricant des cellules composantes et des sous-cellules du DUT sont identiques.

8.1.5 Capteur d'éclairement de référence à l'intérieur

Il s'agit d'un capteur qui permet d'étalonner la sortie d'éclairement du simulateur solaire pour le DUT. Le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur est utilisé comme instrument de référence secondaire par étalonnage par rapport à un instrument de référence principal (NIP). Le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur doit être linéaire et stable comme le définit l'IEC 60904-10 sur la plage d'éclairement concernée. (L'étalonnage est décrit en 9.4). Le réglage du simulateur solaire permet au capteur d'éclairement de référence à l'intérieur de générer son éclairement, étalonné $I_{sc,cal}$, lorsqu'il est éclairé. La construction du dispositif d'éclairement de référence à l'intérieur doit être quasi-identique à celle du DUT. Les critères suivants doivent être satisfaits pour assurer ce caractère quasi identique:

- a) la conception, les matériaux, la longueur focale, la dimension et le fabricant du trajet optique individuel entre la lumière collimatée externe et la cellule (principale et secondaire le cas échéant) doivent être identiques;
- b) la conception, les matériaux, la dimension et le fabricant de la ou des cellules doivent être identiques.

En d'autres termes, le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur doit constituer une adaptation au DUT représentative. Il peut toutefois comporter moins de paires optiques/de cellules produisant une fraction de la superficie d'entrée totale du dispositif. Le plus petit dispositif doit comporter au moins une paire optique/de cellules, appelée ci-après "monomodule".

Les critères susmentionnés doivent permettre de s'assurer que le capteur a une sensibilité, mesurée selon la valeur I_{sc} , à l'éclairement, à l'alignement angulaire et au spectre quasi identique à celle du DUT. Il convient de sélectionner un autre capteur d'éclairement de référence si, pour quelque raison que ce soit, il est supposé que la réponse du capteur d'éclairement de référence présente un écart par rapport à celle du DUT. La réponse angulaire d'un monomodule peut être différente de celle du DUT en cas de désalignements importants entre les performances des cellules du DUT. Dans ce cas, il convient d'utiliser le DUT également comme le capteur d'éclairement de référence. Cet aspect doit être étudié pour chaque technique et peut varier lorsqu'un fabricant modifie les contrôles d'alignement en usine.

NOTE 1 Lorsqu'il n'existe qu'une seule éprouvette pour une technique donnée, il est alors possible d'utiliser l'éprouvette d'essai proprement dite comme le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur.

NOTE 2 Pour les capteurs qui contiennent des cellules connectées montées en série, un éclairage irrégulier peut causer une surestimation de l'ISC et, de ce fait, une sous-estimation de l'éclairement.

8.1.6 Capteur d'éclairement auxiliaire

Il s'agit d'un dispositif photovoltaïque dont la réponse I_{sc} a fait l'objet d'un étalonnage par rapport à la réponse I_{sc} du capteur d'éclairement de référence à l'intérieur sur la plage concernée. Il est possible d'utiliser ce capteur pour contrôler les variations instantanées de l'éclairement lors de la détente du simulateur. Lorsque ce capteur ne comporte pas d'optique de concentration, il doit comporter en revanche un tube collimateur à angle complet d'ouverture de 5° et angle de pente de 1°. Le capteur d'éclairement auxiliaire doit être linéaire et stable comme le définit l'IEC 60904-10 sur la plage d'éclairement concernée.

8.2 Simulateur solaire

8.2.1 Exigences générales

L'IEC 60904-9-1¹ peut définir les méthodes qui permettent de classer les simulateurs solaires à lumière collimatée nécessaires pour établir si un simulateur spécifique convient à une utilisation avec un DUT à concentrateur photovoltaïque spécifique. Il convient que le simulateur employé soit documenté dans le rapport d'essai, ainsi que son classement conformément à l'IEC 60904-9-1.²

8.2.2 Simulateur de lumière continue

L'état d'éclairage de la source de lumière d'un simulateur de lumière continue est un état sous tension ou actif permanent pendant une durée suffisante qui permet d'exposer et de mesurer le dispositif en essai dans ces conditions de lumière permanente. Il a été démontré que les cellules CPV d'un module dans des conditions de lumière continue à forte concentration, pendant une durée de plus de 10 ms, peuvent participer à un échauffement de plusieurs

¹ A l'étude.

² A l'étude.

degrés Celsius. Par conséquent, ce type de simulateur est souvent inapproprié à une utilisation avec des dispositifs CPV. Il est possible que l'influence d'une lumière continue d'une durée de quelques millisecondes seulement soit significative étant donné que la vitesse d'échauffement peut dépendre de la conception du DUT. Noter que ces problèmes d'échauffement peuvent être évités si la source de lumière du simulateur est sous tension de manière continue, et si la fenêtre d'ouverture du simulateur empêche tout éclairage continu du DUT.

8.2.3 Simulateur à impulsion de détente simple

Il s'agit d'un simulateur qui utilise un système de mesure capable de mesurer la courbe I-V complète du DUT dans des conditions d'impulsion de détente simple de la source de lumière du simulateur. La durée de mesure doit être suffisamment courte pour que l'échauffement de la ou des cellules du DUT ne dépasse pas 2 °C. Un balayage de la courbe I-V dans les deux directions permet d'effectuer une vérification. L'hystérèse entre les deux courbes I-V doit permettre d'établir qu'un échauffement maximal de 2 °C s'est produit. L'échauffement doit être mesuré comme la tension d'hystérèse divisée par le facteur β (voir 9.1.4 pour la détermination de β).

8.2.4 Simulateur à impulsion de détente multiple

Il s'agit d'un simulateur qui utilise un système de mesure qui enregistre uniquement un point de courant-tension ou une plage de courant-tension limitée pour chaque impulsion de détente de la source de lumière. Plusieurs détentes et plusieurs mesurages permettent d'obtenir la courbe I-V complète du DUT.

8.3 Suiveur solaire ou système de montage du DUT

8.3.1 Généralités

Un suiveur solaire est exigé pour diriger le DUT et tout autre appareil sensible à l'alignement vers la lumière solaire incidente. Ce suiveur solaire doit être conforme aux définitions conformément à l'IEC 62817. À l'intérieur, le système de montage du DUT est le matériel qui permet d'installer le DUT et de l'aligner sur la lumière incidente émise par le simulateur solaire. Le suiveur et le système de montage du DUT doivent tous deux être capables de maintenir l'alignement du DUT sur la lumière incidente comme le précise la procédure d'essai correspondante. Dans le cas d'un DUT à concentrateur photovoltaïque conçu pour une poursuite monoaxiale, il convient d'utiliser un suiveur biaxial pour éviter que les caractéristiques assignées ne deviennent dépendantes de la période de l'année concernée.

8.3.2 Capteur d'erreur de pointage

Le capteur d'erreur de pointage mesure l'écart angulaire entre le vecteur normal du capteur et le vecteur de rayonnement direct du soleil (voir Figure 2). L'erreur de pointage peut être répartie en composantes d'erreur de pointage à axe principal et à axe secondaire. Le dispositif doit être conforme à l'Article 7 de l'IEC 62817:2014.

8.4 Mesurage et contrôle de la température

8.4.1 Capteur de température du DUT

Le matériel de contrôle de la température du DUT doit avoir une exactitude de ± 1 °C et une répétabilité de $\pm 0,5$ °C. Deux capteurs au moins doivent être utilisés. Les capteurs doivent être fixés sur la partie arrière du DUT le plus près possible de la partie centrale d'un ensemble de cellules, en utilisant une première cellule sélectionnée dans la partie centrale du DUT et la seconde cellule à proximité du bord du DUT. Lorsque la mise en place des capteurs de température du DUT exige de modifier ce dernier, la modification doit alors être effectuée par le fabricant.

8.4.2 Capteur de température ambiante

Ce capteur doit avoir une exactitude de ± 1 °C et une répétabilité de $\pm 0,5$ °C. Le capteur de température doit être placé dans un écran thermique à plaques multiples et à ventilation passive, et à une distance de 10 m du DUT.

8.4.3 Capteur de température de la lentille ou de l'optique

Le capteur de température de l'optique doit avoir une exactitude de ± 1 °C et une répétabilité de $\pm 0,5$ °C. Il convient que l'ordre du temps de réponse soit inférieur ou égal à 1 s. Le capteur de température doit être choisi de manière à ce que l'interférence sur la lumière entrante à laquelle est soumise l'optique soit minimale, c'est-à-dire la plus faible possible, y compris le câblage avec le capteur. Une méthode qui garantit la conductivité thermique doit permettre de fixer le transducteur réel à la surface de l'optique. Une feuille ou une pellicule blanche réfléchissante mince conçue pour rejeter/refléter l'éclairement solaire entrant doit recouvrir le côté du transducteur faisant face au soleil. La feuille ou la pellicule a pour objectif de réduire le plus possible l'échauffement du capteur dû à l'exposition à la lumière solaire et d'améliorer l'exactitude de mesure de la température de surface optique. L'emplacement du capteur et les câbles doivent rester fixes pendant les mesurages de sorte que tout effet sur l'éclairement entrant à laquelle est soumis le DUT soit constant au cours de l'essai.

8.4.4 Système de contrôle de température

Les exigences générales relatives au contrôle de température sont les suivantes:

- Les capteurs de température du DUT doivent être maintenus à une température de (25 ± 2) °C pour la mesure du DUT à l'intérieur au moyen d'un simulateur solaire. Des contrôles de température en salle de laboratoire permettent généralement de contrôler la température dans le cas des mesurages à l'intérieur. Il est noté que les simulateurs solaires appropriés décrits en 8.2 doivent être utilisés pour les essais à l'intérieur. Ces simulateurs n'échauffent pas les cellules du DUT de plus de 2 °C lors du mesurage de la détente. Un éclairage continu du DUT ne satisfait généralement pas à cette exigence.
- Les DUT qui comportent des systèmes de contrôle de température à liquide ou d'autres systèmes conformes aux modèles du fabricant doivent être soumis à l'essai avec le système de refroidissement actif lorsque cela est approprié.

8.5 Mesurage du courant/de la tension

Les exigences générales relatives aux mesurages I-V sont les suivantes:

- a) Un ensemble d'acquisition de données qui peut balayer la courbe I-V ou qui peut utiliser des capteurs de courant et de tension distincts avec une charge variable permet d'effectuer les mesurages I-V. Le fabricant peut exiger l'application d'une charge électrique afin de maintenir le DUT à proximité ou au niveau du MPP entre les balayages I-V à l'extérieur. Il est admis qu'un fonctionnement à la valeur V_{oc} entre les balayages I-V peut porter la température de la lentille à un niveau supérieur au niveau normalement observé dans les conditions ambiantes données. Il est, par conséquent, possible que ce mode de fonctionnement fausse les résultats consignés dans le rapport d'essai. Les tensions et les courants doivent être mesurés à l'aide d'instruments ayant une exactitude égale à 0,2 % de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit, et en utilisant les conducteurs indépendants du DUT dont la longueur doit être la plus courte possible. Il convient de sélectionner avec soin les plages de mesures de l'ensemble d'acquisition de données. Il convient que les bornes ou les connecteurs du DUT constituent le point de départ de la connexion à quatre fils.
- b) Le courant de court-circuit doit être mesuré à une tension nulle, en appliquant un biais variable (de préférence électronique) afin de décaler la chute de tension dans la résistance série externe. En variante, l'extrapolation du courant de court-circuit peut être réalisée à partir de la caractéristique courant-tension. L'extrapolation de la courbe est réalisée à une tension nulle à condition que la chute de tension ne soit pas supérieure à 3 % de la tension en circuit ouvert du dispositif et que la relation entre le courant et la tension soit linéaire.

- c) Le rapport d'essai doit mentionner le sens du balayage I-V.
- d) Le rapport d'essai doit mentionner la durée d'un balayage I-V simple.

8.6 Anémomètre

Un instrument pour mesurer la vitesse du vent (avec un seuil minimal de 0,25 m/s et une exactitude d'au moins $\pm 0,15$ m/s au seuil minimal) doit être placé à une distance de 3 m à la verticale de la hauteur moyenne du plan d'essai du module suiveur, lorsque celui-ci est en position verticale. À l'horizontale, les instruments de mesure du vent doivent être placés à 10 m du DUT. Le capteur de mesure du vent ne doit pas être disposé en un emplacement dans lequel les obstacles dus au vent génèrent un régime éolien distinct et différent par rapport au suiveur sur lequel le DUT est fixé.

8.7 Charge électrique

Il s'agit d'un dispositif général qui permet de maintenir le DUT à proximité ou au niveau du MPP entre les balayages I-V.

9 Procédures d'essai

9.1 Mesurage des coefficients de température du DUT

9.1.1 Objectif

Les performances thermiques d'un DUT à concentrateur photovoltaïque représentent un double facteur de contribution principal: (1) les signaux électriques produits par les cellules dépendent de la température des cellules, (2) les caractéristiques de concentration optique dépendent de la température de l'optique (les signaux électriques produits par les cellules dépendent ici des caractéristiques de concentration). Le paragraphe 9.1 du présent document concerne la mesure des coefficients de température du DUT relatifs au point (1) et non au point (2). La validation d'une température stable (comme le décrivent les exigences relatives aux données) au cours de l'essai suivant permet cette mesure. Les paragraphes 9.10 et 9.11 traitent du point (2), performances associées à la température optique.

9.1.2 Appareillage

L'Article 8 spécifie les exigences générales relatives à l'appareillage:

- a) pyréliomètre sous incidence normale;
- b) suiveur solaire;
- c) instrument de mesure I-V (au moins à un intervalle de 1 min, une durée inférieure ou égale à 15 s étant toutefois souhaitée);
- d) anémomètre;
- e) capteur de température ambiante;
- f) deux capteurs de température du DUT;
- g) dispositif de mesure spectrale;
- h) capteur d'erreur de pointage;
- i) un capteur de température de la lentille/optique.

9.1.3 Procédure de collecte des données et exigences relatives aux données

La liste suivante fournit des recommandations et des exigences pour collecter les différentes données nécessaires tout au long du présent document.

- a) Monter le capteur d'erreur de pointage, le pyréliomètre, le dispositif de mesure spectrale et tout autre appareil sensible à l'alignement selon 9.9.

- b) Monter le DUT selon les instructions du fabricant ou selon 9.8. Documenter la méthode d'alignement appliquée.
- c) S'assurer que les regards du matériel de mesure de l'éclairement et le DUT sont propres et exempts de toute salissure. Vérifier ces éléments pendant toute la durée de l'essai si nécessaire.
- d) Monter les capteurs de température du DUT et l'anémomètre selon les exigences normalisées spécifiées à l'Article 8.
- e) Monter le capteur de température de la lentille/optique défini selon 8.4.3. Il convient de placer le transducteur le long du côté haute pression du groupe optique du dispositif. La meilleure solution consiste à fixer le transducteur directement sur l'optique et à une distance d'au moins 7 cm à 10 cm du bord du groupe optique afin de réduire le plus possible les effets de bord. Une courbe I-V doit être enregistrée avant et après le montage du capteur de température de la lentille dans des conditions d'éclairement équivalentes. Les courbes I-V doivent faire l'objet d'une comparaison afin de confirmer que la baisse de la puissance maximale ne dépasse pas 2 % en raison de l'interférence du capteur. Noter que ces données d'essai ne servent pas à mesurer la production d'électricité absolue du DUT. Il est, par conséquent, possible d'accepter une perte de 2 % cohérente pour tous les mesurages. En cas d'interférence trop élevée, il est possible de déplacer le capteur vers le bord de la surface optique active et la validation de la courbe I-V doit être répétée. Le mesurage de la température de l'optique peut être considéré comme facultatif si la conception et le matériau de cette optique présentent des propriétés de performances qui se sont avérées stables après une variation de température de 10 °C applicable aux conditions d'essai données.
- f) Il est recommandé d'enregistrer les paramètres suivants au moins toutes les 15 s, l'intervalle de temps maximal devant être de 1 min:
 - l'horodatage;
 - le balayage I-V;
 - la DNI (dans un délai de 1 s, avant et après le balayage I-V);
 - les valeurs SMR issues des cellules de référence composantes normalisées ou, le cas échéant, issues d'un dispositif de mesure spectrale approprié;
 - la vitesse du vent;
 - l'erreur de pointage associée au DUT;
 - la température ambiante;
 - la température du DUT (2);
 - la température de la lentille.
- g) Recouvrir le DUT d'un linge ou de tout autre revêtement pour refroidir le DUT. La lumière diffuse est censée pénétrer un linge et la valeur V_{oc} n'est pas nulle pendant le refroidissement. Cette situation n'influe pas sur l'obtention de résultats exacts. Les résultats d'essai indiquent que lorsque la surface optique du DUT est recouverte du linge ou du revêtement, le refroidissement de l'optique peut être supérieur à 2 °C après le retrait du linge ou du revêtement (ce qui donne des coefficients de température erronés). Le placement du linge à une hauteur de plus de 7 cm par rapport à la surface optique pendant le refroidissement du DUT a permis de résoudre ce problème. Cette position permet la circulation de l'air, à une température proche de la température ambiante, entre le revêtement et l'optique, en évitant tout échauffement de l'optique. Contrôler les capteurs de température du DUT afin de s'assurer du refroidissement suffisant de celui-ci par rapport aux conditions préalables au recouvrement (les analyses de divers modules CPV à concentration élevée révèlent qu'un refroidissement de 15 °C au moins peut être obtenu). Après refroidissement du DUT et stabilisation de sa température à 2 °C près pendant une période de 5 min, le revêtement du DUT est retiré rapidement (< 2 s) alors que les courbes I-V et les paramètres supplémentaires sont mesurés simultanément à l'échauffement du DUT. Le capteur de température des cellules et le capteur de température du DUT ne sont pas censés se déplacer en parallèle au cours des premières secondes qui suivent le retrait du linge (l'échauffement en ms des cellules est rapide alors que l'échauffement des capteurs de température du DUT est insuffisant). Au terme des

3 à 5 premières secondes, la température des cellules et la température du DUT augmentent selon un taux approximativement biunivoque. Ce taux permet d'utiliser les variations mesurées de la température du DUT comme approximation pour déterminer les variations de température des cellules.

- h) Les éléments suivants doivent être vrais pour pouvoir utiliser les données collectées, après le retrait d'un revêtement, afin de déterminer les coefficients de température: noter que la période de collecte des données afin de déterminer un coefficient de température peut être moins longue que la période pendant laquelle la dernière courbe I-V enregistre le retrait du revêtement. Il est considéré que la période de collecte des données commence à la première courbe I-V valable après le retrait du revêtement, jusqu'à la dernière courbe I-V valable simultanément à l'échauffement du DUT. Par exemple, la dernière courbe valable peut avoir pour origine le masquage du soleil par un nuage, l'augmentation de la vitesse du vent ou un taux d'augmentation de la température du DUT nettement inférieur à celui enregistré par la série précédente de courbes I-V.
- Il est possible de supprimer des points de données au début et à la fin d'une période de collecte des données. Aucun point de données ne doit toutefois être retiré de l'intervalle de temps restant.
 - Pour l'intervalle de temps restant, la variation de la température du DUT doit être au moins de 10 °C alors qu'une variation de 15 °C est recommandée (cette variation exige généralement une période de stabilité de la DNI comprise entre 5 min et 10 min selon les exigences ci-dessous).
 - L'intervalle de temps restant doit couvrir au moins 5 min et comporter au moins 10 points de données.
 - La DNI qui précède et qui suit immédiatement chaque balayage I-V pour tous les points de données doit être de 0,5 %.
 - La DNI maximale et minimale sur l'ensemble de la période de collecte des données doit être de 2 %;
 - La DNI doit être comprise entre 700 W/m² et 1 100 W/m².
 - Les rapports SMR(1,2), SMR(1,3) et SMR(2,3) doivent correspondre à l'unité avec une marge de 5 %.
 - Il convient que la vitesse instantanée du vent soit inférieure à 5 m/s (Noter qu'il est possible de placer des dispositifs coupe-vent afin, d'une part, d'atténuer les variations de la vitesse du vent qui génèrent des écarts significatifs de la vitesse d'échauffement du DUT et, d'autre part, d'assurer une augmentation de température du DUT plus importante pendant l'essai). Les résultats d'essai s'avèrent être des résultats mieux adaptés pour les coefficients de température lorsque des dispositifs coupe-vent servent à réduire la vitesse du vent direct auquel est exposée la partie arrière du DUT. Noter que la vitesse instantanée du vent s'applique dans le cas présent, alors que d'autres essais décrits dans le présent document utilisent la vitesse moyenne du vent. L'état du DUT utilisé dans cet essai n'étant pas un état permanent, la vitesse moyenne du vent ne peut donc pas être appliquée.
 - La variation de la température ambiante ne doit pas être supérieure à 1 °C au cours de la période de collecte des données. (Le fabricant du DUT peut exiger d'effectuer cet essai à une température ambiante lorsque le caractère relativement stable de l'alignement entre la lentille et les cellules est établi.)
 - La variation de la température de la lentille ne doit pas être supérieure à 2 °C tout au long de la période de collecte des données.
 - L'erreur de pointage doit se situer dans les limites établies par les données de sensibilité de désalignement (voir 9.8), qui indiquent que la baisse du rapport MPP/DNI normalisé ne dépasse pas 1 %. Pour cet essai, il est généralement recommandé de maintenir l'erreur de pointage inférieure à $\pm 0,1^\circ$.
 - L'augmentation biunivoque de la température moyenne des capteurs de température du DUT et de la température des cellules doit être confirmée (voir i) ci-dessous).
 - La différence entre les deux capteurs de température du DUT doit être constante à $\pm 1^\circ\text{C}$ pendant la période de collecte des données. Noter que le mesurage de la

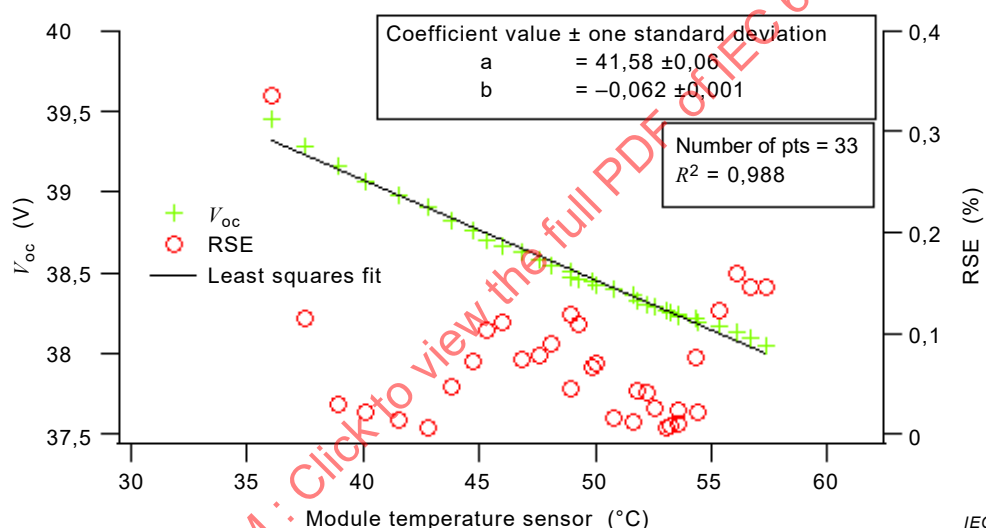
température du DUT à proximité de la partie centrale du DUT est généralement censée être plus précise que le mesurage à proximité du bord du DUT.

- i) L'augmentation biunivoque de la température moyenne des capteurs de température du DUT et de la température des cellules doit être confirmée comme suit: (Comme mentionné ci-dessus, il est possible de supprimer des points de données au début et à la fin d'une période de collecte des données. Cette validation est par conséquent applicable au seul intervalle de temps restant). La validation consiste à établir un graphique de la valeur V_{oc} du DUT par rapport à sa température et à ajuster les données par une régression des moindres carrés. Les éléments suivants doivent être vrais: (voir la Figure 5 et la Figure 6 pour un exemple de cette procédure).

- L'erreur quadratique (RSE ou *Root Square Error* en anglais) sous forme de pourcentage de la valeur attendue des moindres carrés doit être inférieure ou égale à 0,25 % pour chaque point de données. L'erreur quadratique sous forme de

pourcentage est définie comme suit
$$RSE = \frac{100 \sqrt{(V_{oc} - V_{oc,fit})^2}}{V_{oc,fit}}$$

- Le coefficient de détermination, R au carré, doit être supérieur ou égal à 0,98.

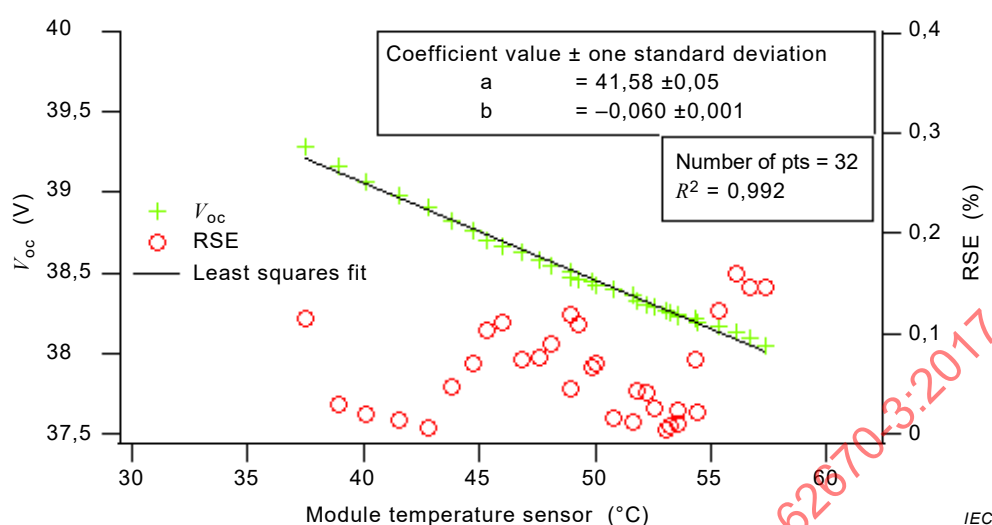


Anglais	Français
Coefficient values ± one standard deviation	Valeurs de coefficients ± un écart-type
Number of pts	Nombre de points
RSE	Erreur quadratique
Least squares fit	Ajustement par les moindres carrés
Module temperature sensor	Capteur de température de module

Figure 5 – Données V_{oc} après le retrait du revêtement

La Figure 5 présente les données V_{oc} issues des courbes I-V après le retrait du revêtement qui font l'objet d'un graphique par rapport aux données de température issues de la partie arrière du DUT. Le trait plein correspond à l'ajustement par les moindres carrés et les points vides correspondent à l'erreur quadratique sous forme de pourcentage de la valeur attendue. L'erreur quadratique sous forme de pourcentage et le coefficient de détermination, R au carré, permettent d'établir si les variations relatives de la température du capteur de température du DUT représentent les variations de la température des cellules de manière suffisante. L'erreur quadratique sous forme de pourcentage doit être inférieure ou égale à 0,25 % pour chaque point de données et R au carré doit être supérieur ou égal à 0,98. Dans le graphique, l'erreur

quadratique est supérieure à 0,25 % pour le premier point de données proche d'une température de 36 °C, tandis que R au carré est supérieur à 0,98.



Anglais	Français
Coefficient values $\pm$ one standard deviation	Valeurs de coefficients $\pm$ un écart-type
Number of pts	Nombre de points
RSE	Erreur quadratique
Least squares fit	Ajustement par les moindres carrés
Module temperature sensor	Capteur de température de module

Figure 6 – Figure 5 reprise après suppression d'un point de donnée

La Figure 6 est identique à la Figure 5 à la différence qu'un point de données de la Figure 5, dont la valeur était supérieure à l'exigence relative à l'erreur quadratique a été supprimé, puis que l'ajustement par les moindres carrés a fait l'objet d'un nouveau calcul. L'ensemble de données restant satisfait à l'exigence du présent paragraphe.

9.1.4 Détermination des coefficients de température

La procédure décrite en 9.1.3 doit être répétée autant de fois que nécessaire pour obtenir des données acceptables issues d'au moins 5 retraits de revêtement différents effectués sur au moins 2 jours différents. L'écart maximum acceptable entre les coefficients de température moyens pour le rendement du DUT sur les deux jours distincts doit être de 30 % environ; à défaut, l'essai doit être répété. Pour chaque retrait de revêtement unique, tracer des graphiques de la température moyenne des 2 capteurs de température du DUT par rapport aux valeurs V_{oc} , I_{sc}/DNI , η , et FF. Calculer l'ajustement par les moindres carrés pour chaque graphique. La pente de l'ajustement par les moindres carrés constitue une instance individuelle d'un coefficient spécifique pour le DUT fourni. Le coefficient " b " représenté à la Figure 6 est un exemple d'instance individuelle du coefficient V_{oc} pour le dispositif fourni. Les coefficients de température consignés dans le rapport d'essai doivent correspondre au coefficient moyen déterminé sur la base d'au moins 5 (ou plus) retraits de revêtement acceptables. Partout dans le présent document, δ est le coefficient de rendement (absolu en %/K), β est le coefficient de V_{oc} (V/K) et α est le coefficient de I_{sc} (A/K). Noter que le graphique décrit ci-dessus s'applique à la relation I_{sc}/DNI . Par conséquent, pour déterminer le coefficient α , la pente moyenne de la relation I_{sc}/DNI doit être multipliée par l'éclairement de référence qui est égal à 900 W/m², applicable à l'Équation (5). Noter que le calcul du rendement du DUT s'effectue selon l'Équation (9).

Noter que l'exclusion des données issues du retrait du revêtement est recommandée si l'ajustement par les moindres carrés associé pour FF satisfait à l'un des critères suivants:

- $R^2 > 0,7$ et la pente est supérieure à 0 %/K,
- $R^2 > 0,7$ et la pente est inférieure à $-0,1$ %/K,

Cette recommandation repose sur l'hypothèse selon laquelle le coefficient FF propre à plusieurs cellules de jonction est généralement proche de $-0,05$ %/K. Lorsque le coefficient FF mesuré est supérieur à un coefficient différent à 100 % de cette valeur type (comme cela est le cas dans les exclusions recommandées ci-dessus), il est admis que ce phénomène a vraisemblablement pour origine les effets de température de la lentille que l'essai susmentionné n'était pas censé comporter. Les résultats d'essai indiquent que le maintien d'une variation de température de la lentille à moins de 2 °C permet d'obtenir la plage FF recommandée, dans le cas de différents DUT à concentrateur photovoltaïque.

9.2 Valeur V_{oc} de référence du DUT (dans des conditions d'éclairement de 900 W/m² et à une température des cellules de 25 °C)

9.2.1 Généralités

La valeur V_{oc} de référence du DUT sert principalement d'élément de calcul de la température des cellules en présence d'un dispositif à concentrateur photovoltaïque exposé au soleil à l'extérieur. Étant donné que le calcul de la température des cellules est sensible à l'incertitude de la valeur V_{oc} de référence, il est par conséquent souhaitable de déterminer cette valeur avec la plus grande exactitude. Il existe deux méthodes de détermination de la valeur V_{oc} de référence, des courbes I-V d'obscurité et des mesurages par simulateur. Il est souhaitable que le calcul de la température des cellules utilise une valeur V_{oc} de référence à l'éclairement moyen pour l'ensemble de données I-V extérieures, pour le DUT et à une température de 25 °C: un éclairement de 900 W/m² est spécifié dans le cas présent dans la mesure où il s'agit de la valeur médiane dans la plage admissible de densités d'irradiation (700 W/m² à 1 100 W/m²). (Il est possible d'utiliser un autre éclairement ou d'appliquer une autre température de référence en partant du principe que tous les termes nécessaires pour le calcul de la température des cellules sont modifiés en conséquence et que les modifications sont documentées dans le rapport d'essai.)

9.2.2 Procédure de mesure des courbes I-V d'obscurité pour la détermination de la valeur V_{oc} de référence

Les procédures et les équations données ci-après permettent de déterminer la valeur V_{oc} de référence à partir des courbes I-V d'obscurité mesurées pour le DUT.

La mesure de courbes I-V d'obscurité successives sur le DUT doit permettre de déterminer la valeur V_{oc} de référence. Une valeur de courant nulle et une valeur équivalant au moins à 1,7 fois la valeur I_{sc} attendue en dessous de 1 000 W/m² constituent respectivement les points de départ et de fin de la première courbe. Une valeur équivalant à 1,7 fois la valeur I_{sc} attendue en dessous de 1 000 W/m² et une valeur de courant nulle constituent respectivement les points de départ et de fin de la seconde courbe (il est possible d'utiliser l'ensemble de données I-V extérieures et la linéarité estimée entre la valeur I_{sc} et l'éclairement pour déterminer la valeur I_{sc} attendue en dessous de 1 000 W/m²). Il peut s'avérer nécessaire que le fabricant fournisse un DUT dont les diodes ont été retirées afin de pouvoir mesurer les courbes I-V d'obscurité. Un soin particulier doit être apporté au mesurage des courbes I-V d'obscurité en limitant les courants maximums obtenus (selon les instructions du fabricant) de manière à ne pas endommager le DUT. Les mesurages des courbes I-V d'obscurité doivent être réalisés dans un environnement contrôlé qui garantit une température du DUT égale à (25 ± 2) °C. (Comme mentionné préalablement, il est possible d'appliquer une autre température de référence en partant du principe que tous les termes nécessaires pour le calcul de la température des cellules sont modifiés en conséquence et que les modifications sont documentées dans le rapport d'essai.) Un capteur de température du DUT au moins doit vérifier la température. Il convient que la vitesse du dispositif de mesure des courbes I-V soit suffisante ou que ce dispositif soit un système de mesure pulsé afin de s'assurer de l'insuffisance de l'échauffement de la ou des cellules en raison du courant

injecté. L'hystérèse entre les deux courbes I-V d'obscurité doit permettre d'établir qu'un échauffement maximal de 2 °C s'est produit. L'échauffement doit être mesuré comme la tension d'hystérèse divisée par le facteur β (voir 9.1.4 pour la détermination de β).

Les points de tension individuels de la courbe I-V d'obscurité sont convertis en conditions de luminosité correspondantes selon l'Équation (1) où V représente la tension, I le courant et R la résistance. Les indices luminosité et obscurité représentent les conditions de luminosité et d'obscurité respectivement et R_s représente la résistance série du DUT. Noter que l'Équation (1) n'est pas reconnue comme une méthode valable de conversion de la courbe I-V d'obscurité complète en conditions de luminosité. Elle est en revanche reconnue comme valable uniquement pour déterminer la valeur V_{oc} de référence dans des conditions de luminosité.

$$V_{\text{luminosité}} = V_{\text{obscurité}} - I_{\text{luminosité}} \times R_s \quad (1)$$

L'Équation (1) devient l'Équation (2) lorsque son évaluation permet de calculer la valeur V_{oc} de référence (V_{ocr}).

$$V_{ocr} = V_{\text{obscurité}}(I_{scr}) - I_{scr} \times R_s \quad (2)$$

$V_{\text{obscurité}}(I_{scr})$ est le point de tension sur la courbe I-V d'obscurité où la mesure de $I_{\text{obscurité}} = I_{scr}$ est mesuré selon le 9.4. La résistance série doit être extraite de la zone de courant élevé de la courbe I-V d'obscurité. Il est recommandé de limiter la zone de courant élevé à des paires I-V d'obscurité avec lesquelles la tension est supérieure à $(V_{oc} + V_{mp})/2$. Les données I-V extérieures permettent de calculer les valeurs V_{oc} et V_{mp} . La résistance série doit être prise égale au point d'intersection de l'ajustement linéaire du graphique des données I-V d'obscurité sous la forme $\frac{dV}{dI}$ par rapport à $\frac{1}{I}$. Lorsque le graphique de $\frac{dV}{dI}$

par rapport à $\frac{1}{I}$ présente un comportement non linéaire significatif au niveau des paires courant/tension inférieures, il convient d'exclure la partie non linéaire de l'ajustement (les paires I-V peuvent être exclues pour des tensions inférieures ou égales à V_{oc}). En cas de point d'intersection négatif de l'ajustement, la résistance série doit être prise comme nulle pour l'évaluation de l'Équation (2).

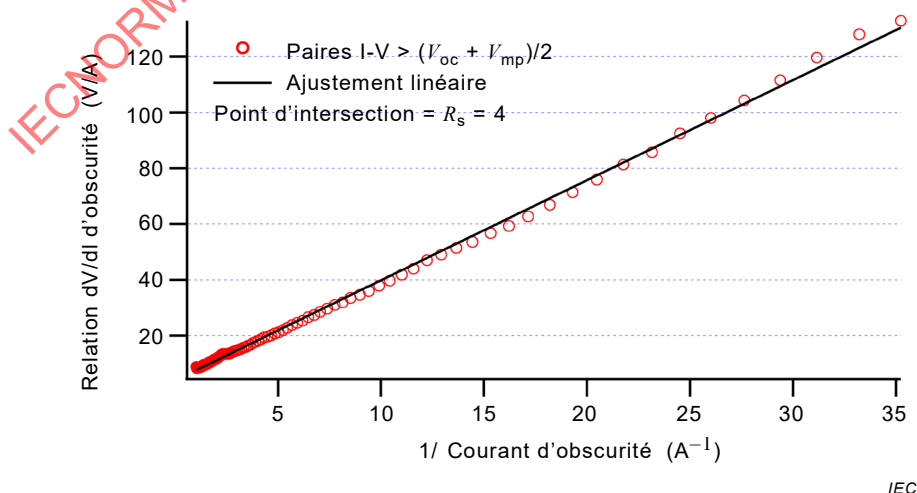


Figure 7 – La dérivée des données I-V d'obscurité tracée pour déterminer R_s

La Figure 7 présente la dérivée des données I-V d'obscurité dans la zone de courant élevé telle qu'elle est utilisée pour extraire la résistance série du DUT. Les points vides présents dans la Figure 7 correspondent aux dérivées calculées entre des paires I-V d'obscurité successives pour les paires I-V $> \sim (V_{oc} + V_{mp})/2$. Le point d'intersection du trait plein, qui constitue l'ajustement linéaire des points vides, permet de déterminer la résistance série. Il doit être tout particulièrement évité que l'ensemble de données I-V d'obscurité n'intègre un comportement non linéaire à des courants inférieurs.

9.2.3 Valeur V_{oc} de référence avec un simulateur solaire

Les exigences suivantes permettent la détermination de V_{ocr} par un simulateur solaire.

- En cas d'utilisation d'un capteur distinct d'éclairement de référence à l'intérieur: Le système de contrôle de la température permet de maintenir la température du DUT à $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Le simulateur solaire est réglé de sorte que le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur obtienne la valeur $I_{sc,cal}$ pendant le mesurage de la courbe I-V pour le DUT. La courbe I-V mesurée permet de déterminer V_{ocr} comme la valeur V_{oc} .
- Lorsque le DUT est utilisé comme capteur d'éclairement de référence à l'intérieur: Le système de contrôle de la température permet de maintenir la température du DUT à $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Le simulateur solaire est réglé de manière à obtenir la valeur $I_{sc,hot900}$ (voir Équation (4)) selon la courbe I-V éclairée, mesurée pour le DUT. La courbe I-V mesurée permet de déterminer la valeur $\sim V_{ocr}$ comme la valeur V_{oc} . La température moyenne de cellule associée à $I_{sc,hot900}$ (voir Équation (4) et 9.4.3) est calculée selon 9.3, où $I_{sc,hot900}$ et $\sim V_{ocr}$ servent de valeurs de référence. L'Équation (5) permet alors de corriger $I_{sc,hot900}$ à une température de $25 ^\circ\text{C}$ (c'est-à-dire de déterminer $I_{scr} = I_{sc,cal}$ pour le DUT). Le simulateur est à présent réglé pour obtenir $I_{scr} = I_{sc,cal}$ pour le DUT et la valeur V_{ocr} est déterminée selon la courbe I-V éclairée. (Voir la Figure 8 pour une représentation graphique de cette procédure.)

9.3 Calcul de la température moyenne des cellules du DUT

9.3.1 Objet

Il n'existe aucune méthode admise de mesure directe de la température des cellules fonctionnant dans des conditions de lumière concentrée. Dans la mesure où il existe une corrélation entre les performances du DUT et la température des cellules, le calcul de la température des cellules sous exposition au soleil s'avère par conséquent utile pour chaque mesurage de la puissance à l'extérieur. La procédure décrite ci-dessous est conforme à l'IEC 60904-5 appliquée aux DUT avec des cellules multijonctions. Le calcul décrit s'applique lors de la correction des mesurages de performances à l'extérieur selon les conditions CSTC et CSOC.

9.3.2 Procédure

L'Equation (3) permet de calculer la température de jonction de cellule solaire moyenne d'équilibre d'un DUT à concentrateur photovoltaïque pour une courbe I-V spécifiée soumise à un mesurage à l'extérieur.

NOTE L'Equation (3) est évaluée en degrés Kelvin, et non en degrés Celsius.

$$T_c = \frac{V_{oc} - V_{ocr} + \beta \times T_r}{N_s \left(\frac{nk}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{scr}} \right) + \beta} \quad (3)$$

où

V_{oc} est la tension mesurée en circuit ouvert du DUT, (V);

N_s est le nombre de cellules en série du DUT;

V_{ocr} est la tension en circuit ouvert du DUT à 298,15 K et 900 W/m² (voir 9.2).

Noter que la tension V_{ocr} peut être définie à une autre température et un autre éclairement, mais que les valeurs I_{scr} et T_r doivent être modifiées selon ces autres conditions.

- n est le facteur d'idéalité de diode pour la cellule (adimensionnel, facteur de 3 théorique pour les cellules à triple jonction, facteur de 4 pour quatre cellules de jonction);
- k est la constante de Boltzmann, $1,380\,66 \times 10^{-23}$, (J/K);
- T_c est la température moyenne calculée des cellules à l'intérieur du DUT, (K);
- q est la charge élémentaire, $1,602\,18 \times 10^{-19}$, (C);
- I_{sc} est le courant de court-circuit mesuré du DUT, (A);
- I_{scr} est le courant de court-circuit du DUT à 298,15 K et 900 W/m² (voir 9.4);
- β est le coefficient de température de V_{oc} , (V/K) (voir 9.1);
- T_r est la température de référence pour les mesurages de cellules, (298,15 K).

9.4 Étalonnage du capteur d'éclairement de référence et détermination de la valeur I_{sc} de référence.

9.4.1 Objet

Le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur et le DUT doivent être mesurés à l'extérieur afin de déterminer I_{sc} dans les conditions de référence (le DUT réel peut être utilisé comme capteur de référence à l'intérieur ou il peut s'agir d'un autre capteur, voir 8.1.5). Le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur permet de régler la sortie du simulateur solaire afin d'établir les performances dans des conditions CSTC. D'autre part, la valeur I_{sc} de référence pour le DUT permet également de calculer la température des cellules sous exposition au soleil. La méthode suivante permet de réaliser un étalonnage de I_{sc} dans des conditions naturelles de lumière solaire par rapport à un pyrhéliomètre (dont la traçabilité s'effectue selon une référence radiométrique mondiale, voir 8.1.1) dans une plage limitée de conditions spectrales selon les mesurages du spectre au moyen d'un dispositif de mesure spectrale (étalonnage en tant que cellules de référence principales ou secondaires, voir 8.1.3). Le capteur d'éclairement de référence est étalonné selon les données I-V collectées selon 9.6.

9.4.2 Exigences relatives aux données

Ces exigences sont identiques à celles décrites en 9.7.1.

9.4.3 Détermination de la valeur I_{sc} étalonnée de référence, ($I_{sc, cal}$ et I_{sc})

Noter que la procédure suivante permet de déterminer les valeurs $I_{sc, cal}$ et I_{scr} , où $I_{sc, cal}$ est un courant de court-circuit étalonné à utiliser comme capteur d'éclairement de référence à l'intérieur et I_{scr} est un courant de court-circuit de référence pour un DUT spécifique. Ce courant permet de calculer la température des cellules à l'extérieur pour ce DUT spécifique. I_{scr} est la valeur de référence spécifique à un éclairement de 900 W/m², mais il est possible de déterminer la valeur $I_{sc, cal}$ pour d'autres densités d'irradiation dans la plage comprise entre 700 W/m² et 1 100 W/m² selon une mise à l'échelle linéaire, par exemple 1 000 W/m² selon les conditions CSTC.

Pour toutes les courbes I-V mesurées qui satisfont aux exigences relatives aux données selon 9.7.1, calculer le courant I_{sc} chaud à un éclairement de 900 W/m² selon l'Équation (4), où N est le nombre total de courbes I-V filtrées. Le terme "courant I_{sc} chaud" est utilisé étant donné que les mesurages de courbes I-V à l'extérieur s'effectuent généralement à des températures de cellules plus élevées que la température de référence de 25 °C.

$$I_{sc, hot900} = 900 \left(\sum_i \frac{I_{sc_i}}{DNI_i} \right) / N \quad (4)$$

La valeur I_{sc} de référence ou étalonnée fait ensuite l'objet d'un calcul par correction de température selon l'Équation (5), où la température moyenne de cellule des courbes I-V filtrées est fournie par l'Équation (6), (voir 9.3 pour le calcul de la température des cellules et 9.1 pour la détermination du coefficient de température).

$$I_{scr} = I_{sc,hot900} - \alpha(T_{c,avg} - T_r) \quad (5)$$

$$T_{c,avg} = \left(\sum_i T_{c,i} \right) / N \quad (6)$$

Noter que le calcul de $T_{c,i}$ selon l'Équation (3) exige la valeur I_{scr} , c'est-à-dire l'Équation (5), alors que l'Equation (5) exige le résultat du calcul de la température des cellules. L'approche itérative simple décrite ci-dessous permet de pallier l'interdépendance de ces deux équations. La température des cellules (Equation (3)), exige à la fois une valeur V_{oc} de référence et la valeur I_{sc} . La première étape consiste à appliquer l'ensemble de données I-V à l'extérieur filtré afin de déterminer $I_{sc,hot900}$. La valeur $I_{sc,hot900}$ permet alors d'établir une tension de référence approchée ($\sim V_{ocr}$). La valeur $\sim V_{ocr}$ est calculée soit par remplacement de $I_{scr} = I_{sc,hot900}$ dans l'Equation (2), soit par mesure de la courbe I-V du DUT avec le simulateur solaire réglé sur $I_{sc,calibration} = I_{sc,hot900}$. Dans les deux cas, la valeur $\sim V_{ocr}$ est censée être une valeur approchée raisonnable qui permet de calculer la température des cellules. $V_{ocr} = \sim V_{ocr}$ et $I_{scr} = I_{sc,hot900}$ permettent d'évaluer l'Equation (3). L'Equation (6) peut alors être déterminée sur la base des calculs approchés pour la température des cellules et l'Equation (5) peut être calculée pour I_{scr} . La valeur I_{scr} , utilisée à présent avec les données I-V d'obscurité ou un simulateur solaire, permet de déterminer la valeur V_{ocr} . Il est possible de calculer d'autres itérations. Le coefficient I_{sc} relatif à une cellule à triple jonction étant toutefois généralement de l'ordre de 0,07 %/K, il est probable que l'effet d'une deuxième itération sur le calcul de $T_{c,avg}$ soit inférieur à 0,5 °C, ce qui est nettement moins important que l'incertitude du calcul de la température des cellules.

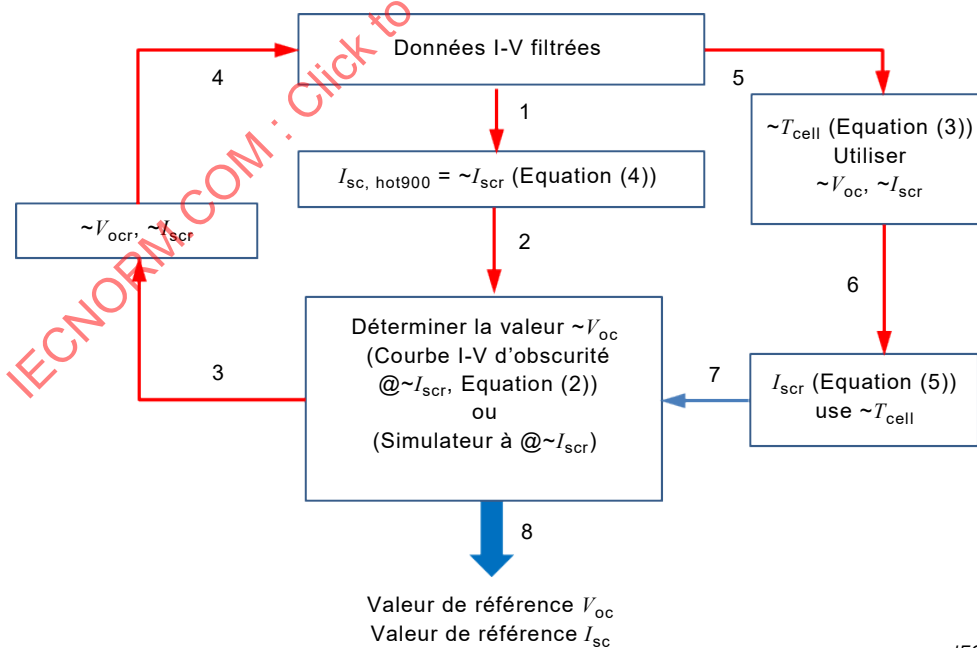


Figure 8 – Approche itérative pour établir I_{sc} et V_{oc}

La Figure 8 présente l'organigramme établissant l'approche itérative simple exigée pour établir les valeurs de référence pour I_{sc} et V_{oc} . Les flèches de flux sont numérotées afin de

clarifier le sens du mouvement dans l'organigramme. Les valeurs de référence sont déterminées aux étapes 7 et 8.

9.4.4 Exigence d'étalonnage

L'étalonnage, $I_{sc,cal}$, doit être au moins annuel. Il convient toutefois de le répéter s'il est avéré que les performances du capteur d'éclairement de référence à l'intérieur ont été modifiées. Une méthode simple de vérification périodique de la stabilité de l'unité de référence utilisée de manière régulière consiste à réaliser un mesurage juxtaposé par rapport à une autre unité de référence de même technologie ayant fait l'objet d'un stockage à l'extérieur et exempt de toute détérioration.

Il est possible que les modifications éventuelles de technologie des éprouvettes qui influent sur leurs sensibilités spectrales, angulaires ou thermiques annulent l'utilisation de l'unité de référence CPV, étalonnée précédemment comme capteur de référence valable.

9.5 Mesurages I-V à l'intérieur d'un DUT à concentrateur photovoltaïque

9.5.1 Objet

Il s'agit de déterminer la caractéristique courant-tension du DUT dans des conditions d'éclairement étalonnée et avec une température des cellules de 25 °C.

9.5.2 Exigences générales concernant les mesurages

Les exigences concernant les mesurages du simulateur solaire du DUT sont les suivantes:

- a) Le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur, défini en 8.1.5 et étalonné tel que défini en 9.4, doit permettre de déterminer les valeurs absolues d'éclairement selon les mesurages de la détente du DUT.
- b) L'éclairement instantané doit être mesuré dans le plan d'essai pendant toute la période de détente. Ce mesurage peut être effectué à l'aide du capteur d'éclairement de référence à l'intérieur ou du capteur d'éclairement auxiliaire si nécessaire.
- c) Les corrections des mesurages I-V dues à la variation d'éclairement pendant la détente doivent être appliquées conformément à l'IEC 60891. Lorsque le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur est séparé du DUT, et permet de mesurer la variation d'éclairement lors de la détente, le calcul des corrections s'effectue alors sur la base de la réponse I_{sc} du capteur. Lorsque les dimensions du capteur d'éclairement de référence à l'intérieur ne permettent pas de le mesurer simultanément avec le DUT, ou lorsque le DUT est également le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur, un capteur d'éclairement auxiliaire doit servir à mesurer la variation d'éclairement instantanée tout au long des mesurages de courbes I-V et à déterminer les corrections d'éclairement.
- d) La température du capteur d'éclairement et du DUT doit être maintenue selon 8.4.4.
- e) Les instruments selon 8.5 doivent permettre de mesurer les tensions et les courants.
- f) Il convient que le simulateur solaire employé soit au moins de classe cXXABA conformément à l'IEC 60904-9-1³, où XX représente la valeur de l'angle de collimation du simulateur. Par exemple, un simulateur de classe c05ABA a un angle de collimation de $\pm 0,5^\circ$. La valeur de l'angle de collimation du simulateur doit être au moins 10 % inférieure à la valeur du demi-angle d'admission du DUT mesurée selon 9.8. Elle ne doit toutefois pas être inférieure à $\pm 0,26$ (angle de collimation moyen de la lumière solaire naturelle).
- g) Les rapports SMR spécifiques au DUT doivent être identifiés lors du mesurage de la courbe I-V du DUT et documentés avec cette même courbe. Les exemples comprennent l'utilisation d'un spectroradiomètre de portée suffisante ou de cellules de référence composantes dont la réponse spectrale est identique à celle des cellules du DUT. Le rapport SMR relatif à chaque combinaison de sous-cellules doit se situer dans des limites

³ A l'étude.

de tolérance d'unité exigées, selon que la sous-cellule concernée génère un courant excessif de plus de 25 % par comparaison avec l'autre sous-cellule relevant du spectre de référence (voir Tableau 1).

Tableau 1 – Exigences relatives au rapport SMR pour les mesurages à l'intérieur

Rapport de courant entre les sous-cellules relevant du spectre de référence	Plage de rapports SMR exigée
$0,75 < \frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} < 1,25$	$1 \pm 0,1$
$\frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} < 0,75$ ou $\frac{I_{i,ref}}{I_{j,ref}} > 1,25$	$1 \pm 0,2$

- h) L'uniformité de l'intensité d'éclairement sur la surface d'essai doit être identifiée et mesurée de manière périodique afin de vérifier que le simulateur est au moins de classe B conformément à l'IEC 60904-9-14.
- i) La répartition de l'intensité d'éclairement et de l'angle dans le plan d'essai n'est pas entièrement uniforme. L'éclairement effectif correspond, par conséquent, à l'éclairement moyenné sur la surface active d'un dispositif. Il convient de mesurer l'unité de référence en différents emplacements de l'enveloppe de l'éprouvette dans le cas d'un capteur d'éclairement de référence à l'intérieur plus petit que le DUT. L'emplacement de montage final du capteur d'éclairement de référence à l'intérieur peut être différent de l'emplacement moyen sur la surface du DUT. Il convient, par conséquent, de corriger cette situation et de la documenter dans le rapport d'essai afin de prendre en compte cette différence.
- j) Selon le DUT, la vitesse de balayage de la tension et la direction de balayage peuvent influencer sur les mesurages I-V. Les cellules de capacité élevée posent davantage de problèmes. Il convient d'analyser ces effets et de les documenter en comparant un balayage I-V qui commence à la valeur I_{sc} avec un balayage qui commence à la valeur V_{oc} .
- k) Toute non-uniformité de l'éclairement incident sur un DUT peut altérer les caractéristiques I-V obtenues. Des diodes en dérivation du circuit d'interconnexion du DUT, les caractéristiques I-V inverses du type de cellule et la répartition de l'éclairement sur la surface d'essai sont autant de facteurs qui influent sur cet effet. Il convient d'analyser attentivement les effets de non-uniformité et d'en tenir compte dans les analyses de l'incertitude.

9.5.3 Procédure d'alignement du DUT à l'intérieur

Le DUT, le capteur d'éclairement de référence à l'intérieur, le capteur d'éclairement auxiliaire (le cas échéant) et le dispositif de mesure spectrale doivent être fixés de manière à être coplanaires dans le plan de montage. La sortie du simulateur étant maintenue à une valeur fixe, contrôler la sortie des dispositifs concernés tout en faisant varier l'angle d'incidence avec la source de lumière collimatée pour chaque dispositif. Il convient, pour l'alignement final, que chaque dispositif se situe au centre de la courbe de réponse par rapport à l'angle d'alignement. Il doit être confirmé que la sortie de chaque dispositif correspond à la valeur maximale obtenue avec une marge de 0,5 %.

9.5.4 Procédure pour les simulateurs solaires à impulsion de détente simple

La procédure unique relative aux simulateurs solaires à impulsion de détente simple est la suivante: