

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Photovoltaic devices –
Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration
traceability**

**Dispositifs photovoltaïques –
Partie 4: Dispositifs solaires de référence – Procédures pour établir la traçabilité
de l'étalonnage**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60904-4

Edition 1.0 2009-06

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Photovoltaic devices –
Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration
traceability**

**Dispositifs photovoltaïques –
Partie 4: Dispositifs solaires de référence – Procédures pour établir la traçabilité
de l'étalonnage**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

T

ICS 27.160

ISBN 978-2-88910-323-2

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope and object.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Requirements for traceable calibration procedures of PV reference solar devices	7
5 Uncertainty analysis	8
6 Calibration report.....	8
7 Marking	8
Annex A (informative) Examples of validated calibration procedures.....	10
Bibliography.....	24
Figure 1 – Schematic of most common reference instruments and transfer methods used in the traceability chains for solar irradiance detectors.	7
Figure A.1 – Block diagram of differential spectral responsivity calibration superimposing chopped monochromatic radiation $DE(l)$ and DC bias radiation E_b	18
Figure A.2 – Optical arrangement of differential spectral responsivity calibration.	19
Figure A.3 – Schematic apparatus of the solar simulator method.	21
Table 1 – Examples of reference instruments, used in a traceability chain of time and solar irradiance.....	7
Table A.1 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of global sunlight method	15
Table A.2 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a differential spectral responsivity calibration	18
Table A.3 – Example of uncertainty components ($k = 2$) of a solar simulator method calibration.....	21
Table A.4 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a solar simulator method calibration when WRR traceable cavity radiometer is used	21
Table A.5 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a direct sunlight method	23

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

**Part 4: Reference solar devices –
Procedures for establishing calibration traceability**

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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 60904-4 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

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

CDV	Report on voting
82/533/CDV	82/561/RVC

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

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

A list of all parts of IEC 60904 series, under the general title *Photovoltaic devices*, can be found on the IEC website.

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

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

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability

1 Scope and object

This part of IEC 60904 sets the requirements for calibration procedures intended to establish the traceability of photovoltaic reference solar devices to SI units as required by IEC 60904-2.

This standard applies to photovoltaic (PV) reference solar devices that are used to measure the irradiance of natural or simulated sunlight for the purpose of quantifying the performance of PV devices. The use of a PV reference solar device is required in the application of IEC 60904-1 and IEC 60904-3.

This standard has been written with single junction PV reference solar devices in mind, in particular crystalline Silicon. However, the main part of the standard is sufficiently general to include other technologies. The methods described in Annex A, however, are limited to single junction technologies.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar devices*

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

ISO 9059, *Solar energy – Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer*

ISO 9846, *Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer*

ISO/IEC Guide 98-3: 2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)*

3 Terms and definitions

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

NOTE The different reference instruments for the traceability chain of solar irradiance are defined in this Clause. Table 1 lists and compares them with those in use for time. Figure 1 shows schematically the most common traceability chains, based on the methods described in Annex A.

3.1

primary standard

a device, which implements physically one of the SI units or directly related quantities. They are usually maintained by national metrology institutes (NMIs) or similar organisations entrusted with maintenance of standards for physical quantities. Often referred to also just as the «primary», the physical implementation is selected such that long-term stability, precision

and repeatability of measurement of the quantity it represents are guaranteed to the maximum extent possible by current technology.

NOTE The World Radiometric Reference (WRR) as realized by the World Standard Group (WSG) of cavity radiometers is the accepted primary standard for the measurement of solar irradiance.

3.2

secondary standard

a device, which by periodical comparison with a primary standard, serves to maintain conformity to SI units at other places than that of the primary standard. It does not necessarily use the same technical principles as the primary standard, but strives to achieve similar long-term stability, precision and repeatability.

NOTE Typical secondary standards for solar irradiance are cavity radiometers which participate periodically (normally every 5 years) in the International Pyrheliometer Comparison (IPC) with the WSG.

3.3

primary reference

the reference instrument which a laboratory uses to calibrate secondary references. It is compared at periodic intervals to a secondary standard. Often primary references can be realised at much lower costs than secondary standards.

NOTE Typically a solar cell is used as a reference solar device for the measurement of natural or simulated solar irradiance.

3.4

secondary reference

the measurement device in use for daily routine measurements or to calibrate working references, calibrated at periodic intervals to a primary reference.

NOTE The most common secondary references for the measurement of natural or simulated solar irradiance are solar cells and solar modules.

3.5

traceability

the requirement for any PV reference solar device, to tie its calibration value to SI units in an unbroken and documented chain of calibration transfers including stated uncertainties.

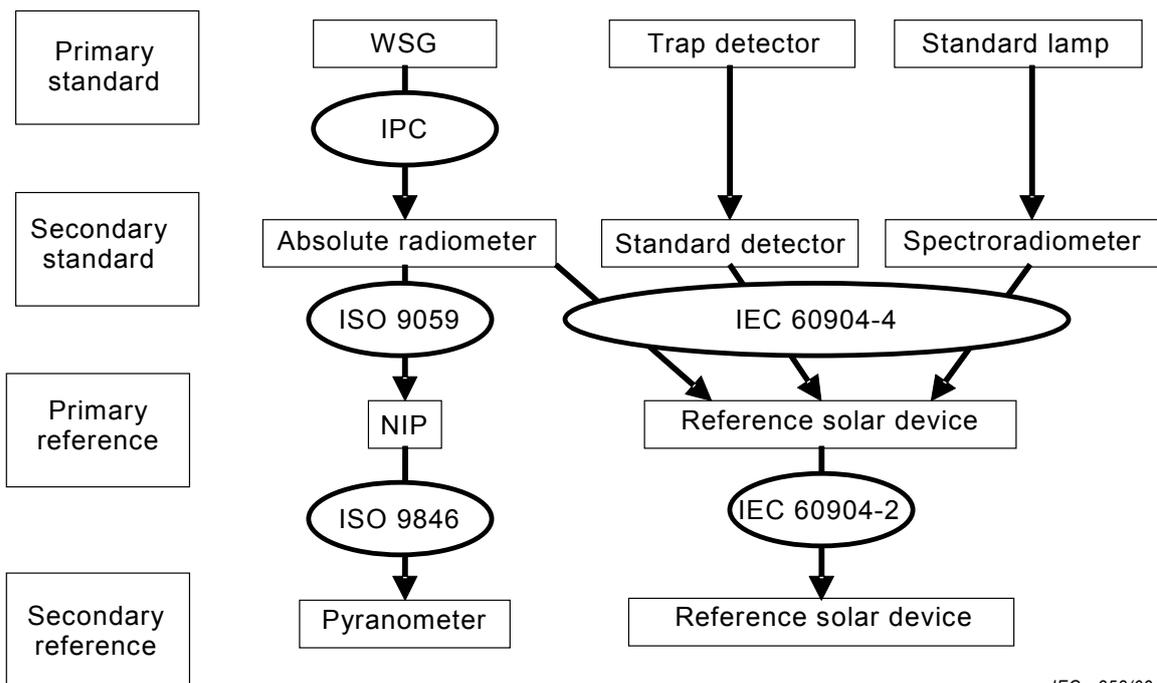
NOTE The WRR has been compared twice to the SI radiometric scale and shown to be within their mutual uncertainty levels. Therefore traceability to WRR automatically provides traceability to SI units. However, the uncertainty of the ratio WRR/SI units needs to be taken into account. The World Radiation Center (WRC) recommends a rectangular uncertainty distribution with 0,3 % half-width. A third comparison is currently underway and should be published in the future.

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **28** (1991) 125-8

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **32** (1995/1996) 523-4

Table 1 – Examples of reference instruments, used in a traceability chain of time and solar irradiance

Reference instrument	Time	Solar irradiance
Primary standard	Cesium atomic clock at National Metrology Institute (NMI)	Group of cavity radiometers constituting the World Standard Group (WSG) of the World Radiometric Reference (WRR) Cryogenic trap detector Standard lamp
Secondary standard	Cesium atomic clock on GPS (Global Positioning System) satellites	Commercially available cavity radiometers compared every 5 years at the International Pyrheliometer Comparison (IPC) Standard detector calibrated against a trap detector Spectroradiometer calibrated against a standard lamp
Primary reference	GPS receiver, set to show time	Normal incidence pyrheliometer (NIP) (ISO 9059) Reference solar device (IEC 60904-2 and IEC 60904-4)
Secondary reference	Quartz watch	Pyranometer (ISO 9846) Reference solar device (IEC 60904-2)



IEC 858/09

NOTE Direct traceability of absolute radiometers to SI radiometric scale may also be available.

Figure 1 – Schematic of most common reference instruments and transfer methods used in the traceability chains for solar irradiance detectors

4 Requirements for traceable calibration procedures of PV reference solar devices

A traceable calibration procedure is necessary to transfer calibration from a standard or reference measuring solar irradiance (such as cavity radiometer, pyrheliometer and pyranometer) to a PV reference solar device. The requirements for such procedures are as follows:

- a) Any measurement instrument required and used in the transfer procedure shall be an instrument with an unbroken traceability chain.
- b) A documented uncertainty analysis.
- c) Documented repeatability, such as measurement results of laboratory intercomparison, or documents of laboratory quality control.
- d) Inherent absolute precision, given by a limited number of intermediate transfers.

NOTE 1 Normally the transfer would be from a secondary standard to a PV reference solar cell constituting a primary reference.

NOTE 2 The transfer from one reference solar device to another is covered by IEC 60904-2.

5 Uncertainty analysis

An uncertainty estimate according to MISC UNCERT – ED. 1.0 (1995-01) shall be provided for each traceable calibration procedure. This estimate shall provide information on the uncertainty of the calibration procedure and quantitative data on the following uncertainty factors for each instrument used in performing the calibration procedure. In particular:

- a) Component of uncertainty arising from random effects (Type A).
- b) Component of uncertainty arising from systematic effects (Type B).

Nevertheless a full uncertainty analysis has to be performed for the implementation of the calibration method by a particular laboratory.

6 Calibration report

The calibration report shall conform to the requirements of ISO/IEC 17025 and shall normally include at least the following information:

- a) title (e.g. "Calibration Certificate");
- b) name and address of laboratory, and location where the tests and/or calibrations were carried out, if different from the address of the laboratory;
- c) unique identification of the report (such as serial number) and of each page, the total number of pages and the date of issue;
- d) name and address of the client placing the order;
- e) description and unambiguous identification of the item(s) tested or calibrated;
- f) date of receipt of calibration item(s) and date(s) of performance of test or calibration, as appropriate;
- g) calibration results including the temperature of the device at which the calibration was performed;
- h) reference to sampling procedures used by the laboratory where these are relevant to the validity or application of the results;
- i) the name(s), title(s) and signature(s) or equivalent identification of person(s) authorising the report;
- j) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested or calibrated.

7 Marking

The calibrated reference solar device shall be marked with a serial number or reference number and the following information attached or provided on an accompanying certificate:

- a) date of (actual or present) calibration;

b) calibration value and its temperature coefficient (if applicable).

Annex A (informative)

Examples of validated calibration procedures

A.1 General

This annex describes examples of calibration procedures for PV reference solar cells as primary reference devices, together with their stated uncertainties. These procedures serve to establish the traceability of reference solar devices to SI units as required by IEC 60904-2. Primary reference devices calibrated in accordance with these procedures serve to establish the traceability of further PV reference solar devices.

As already mentioned in Clause 1, the methods in this annex are limited to PV single junction technology. Moreover, they have currently only been validated for crystalline Silicon technology, although they should be applicable to other technologies.

The methods have been implemented in various laboratories around the world and validated in international intercomparisons, most notably the World Photovoltaic Scale (WPVS). However, the description in this standard is more generalised. For details of the various implementations, the references in peer-reviewed publications are given at the end of each procedure.

The uncertainty estimates are based on U_{95} (coverage factor $k = 2$) for all single components. The combined expanded uncertainty is calculated as the square root of the sum of squares of all components. The uncertainties provided are simplified versions (restricted to the main components) as provided by the laboratories having implemented the procedure. These uncertainty calculations serve as guidelines and will have to be adapted to the particular implementation of each procedure in a given laboratory. The uncertainties achieved by any implementation of these methods might be considerably different. Uncertainties quoted have to be based on an explicit analysis and cannot be taken by reference to the uncertainty estimates in this standard.

A.1.1 Examples of validated methods

- A.2 Global sunlight method
- A.3 Differential spectral responsivity calibration
- A.4 Solar simulator method
- A.5 Direct sunlight method

A.1.2 List of common symbols

I_{SC}	short circuit current of reference cell
T_j	temperature of reference cell
M_G	irradiance correction factor (see below)
M_T	temperature correction factor (see below)
T_{coef}	temperature coefficient α of the short-circuit current (IEC 60891) normalized to the short-circuit current at 25 °C and expressed in 1/ °C
MMF	mismatch factor (see below)
λ	wavelength
$S(\lambda)$	spectral response of reference cell
$s(\lambda)$	differential spectral responsivity of reference cell
$E_m(\lambda)$	spectral irradiance distribution of natural or simulated sunlight
$E_s(\lambda)$	standard or reference spectral irradiance distribution according to IEC 60904-3
G_{dir}	direct irradiance
G_{dif}	diffuse in-plane irradiance
G_T	total in-plane irradiance

E_{STC}	irradiance at STC (= 1 000 Wm ⁻²)
CV	calibration value, i.e. I_{SC} at STC
AM	air mass
STC	standard test conditions (1 000 W/m ² , 25 °C and $E_{\text{s}}(\lambda)$)
P	local air pressure
P_0	101 300 Pa
θ	solar elevation angle

A.1.3 Common equations

The methods described in Clauses A.2, A.4 and A.5 have some common calculations, which are detailed in this subclause. Details of the various implementations are then described in each subclause.

The I_{SC} is normally not measured at exactly 1 000 Wm⁻², but at an irradiance level close to it. Under the assumption that the I_{SC} of the reference cell varies linearly with irradiance, the following correction is made:

$$I_{\text{SC}}(1000 \text{ Wm}^{-2}) = I_{\text{SC}}M_{\text{G}} = I_{\text{SC}} \frac{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{G_{\text{T}}} \quad (\text{A.1})$$

STC mandate a device temperature of 25 °C, but measurements will not always be taken at this temperature. The deviations in temperature should be accounted for in the uncertainty budget. It is also possible to correct I_{SC} from the measurement temperature T_j to 25 °C by multiplying with the temperature correction factor M_{T} defined by

$$I_{\text{SC}}(25 \text{ °C}) = I_{\text{SC}}(T_j)M_{\text{T}} = \frac{I_{\text{SC}}(T_j)}{1 - T_{\text{coef}}(25 \text{ °C} - T_j)} \quad (\text{A.2})$$

The correction for the difference in spectral sensitivity of the reference cell to be calibrated and the device used to measure the irradiance can be described as a MMF

$$MMF = \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_{\text{s}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_{\text{m}}(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} E_{\text{m}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} E_{\text{s}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (\text{A.3})$$

NOTE The integration range is taken based on the definition of $E_{\text{s}}(\lambda)$. If the measurement range, in particular that of $E_{\text{m}}(\lambda)$, does not cover this entire range, suitable approximation, extrapolation or modelling can be used, but needs to be accounted for in the uncertainty calculation.

The calibration value CV of the reference cell is then calculated as

$$CV = I_{\text{SC}}M_{\text{G}}M_{\text{T}}MMF \quad (\text{A.4})$$

A.1.4 References documents

- C. R. Osterwald et al. “The results of the PEP’93 intercomparison of reference cell calibrations and newer technology performance measurements: Final Report”, NREL/TP-520-23477 (1998) 209 pages.
- C. R. Osterwald et al. “The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program”, *Progress in Photovoltaics* 7 (1999) 287-297.
- K. Emery “The results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration”, NREL/TP-520-27942 (2000) 14 pages.

- Winter et al.: “The results of the Second World Photovoltaic Scale Recalibration”, Proc. of the 31st IEEE PVSC 3-7 January 2005, Orlando, Florida, USA, pp. 1011-1014.

A.2 Global sunlight method

The establishment of traceability is based on the calibration using the Continuous Sun-and-Shade Method as described in ISO 9846. The reference solar cell to be calibrated is compared under natural sunlight with two reference radiometers, namely a pyrheliometer measuring direct solar irradiance and a pyranometer measuring diffuse solar irradiance by application of a continuous shade device under normal incidence conditions. The total solar irradiance is determined by the sum of direct irradiance and diffuse in-plane irradiance. As a pyrheliometer, a secondary standard is used in the form of an absolute cavity radiometer compared at 5-year intervals with the World Standard Group (WSG) establishing the World Radiometric Reference (WRR). The calibration factor for the photovoltaic reference cell is determined from the measured short circuit current, scaled to 1 000 W/m² and corrected for spectral mismatch (IEC 60904-7) based on the measured spectral irradiance of the global sunlight and the relative spectral response of the reference solar cell to be calibrated.

Under certain conditions the simplified global sunlight method is applicable. The short-circuit current of the reference cell is scaled to 1 000 W/m² and then plotted versus pressure corrected geometric air mass. The calibration value is determined from a linear least square fit at air mass 1,5. A spectral mismatch correction is not required and hence the measurements of the spectral irradiance of the sunlight and the spectral response are not necessary. In the simplified version of the global sunlight method no explicit spectral mismatch correction is performed and it is replaced by conditions which should ensure that the spectral irradiance of the natural sunlight is sufficiently close to the defined standard spectral irradiance (IEC 60904-3) that the uncertainty component is smaller than quoted in Table A.1. Although this should be ensured by the conditions listed in the description of the method below, it should be explicitly verified (preferentially by using the global sunlight method). After this validation the simplified version can be applied as long as the boundary conditions are the same as during the validation.

NOTE 1 The verification and validation will produce numerical values for both methods. If the agreement between these numerical values is within the uncertainty budget of the methods, the simplified method shall be deemed validated.

NOTE 2 The simplified procedure gives accurate results for devices with a spectral response over a broad range of the solar spectrum e.g. crystalline silicon devices. Significant errors may be introduced for narrow spectral response devices.

A.2.1 Equipment

- a) A mounting platform, which can be oriented normal to the sun within an accuracy of $\pm 0,5^\circ$ throughout the calibration run.
- b) A cavity radiometer, traceable to WRR.
- c) A pyranometer, traceable to WRR.
- d) A shading device to provide shade to item c). The field angle, viewing angle and aperture angle provided by the shade shall compensate the respective descriptive angles of the cavity radiometer of item b).
- e) A temperature controlled mounting block for the reference device under test capable of maintaining the cell temperature at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ throughout all calibration runs.
- f) Traceable means to measure the short circuit current of the solar cell to an accuracy of $\pm 0,1\%$ or better.
- g) Traceable means to measure the signal of the pyranometer to an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better.
- h) A spectroradiometer capable of measuring the spectral irradiance of the total in-plane natural sunlight in the wavelength range of 350 – 2 500 nm (or larger).

NOTE 1 Not required in simplified version.

- i) Apparatus to determine the relative spectral response of the reference solar cell.

NOTE 2 Not required in simplified version.

- j) Means to measure the sun's elevation to a precision of $\pm 2^\circ$. Alternatively, the elevation of the sun during the data sampling can be taken from almanacs or computed, as long as the precision requirement is met for the instant of data sampling. The latter normally requires traceable means to measure time for the computation of air mass.

NOTE 3 Only required in simplified version.

- k) A manometer to measure the local air pressure P to an accuracy of ± 250 Pa or better.

NOTE 4 Only required in simplified version.

A.2.2 Measurements

A calibration according to this standard shall be performed only on clear, sunny days with no visible cloud cover within 30 degrees of the sun.

- a) Determine the relative spectral response of the reference cell to be calibrated.

NOTE 1 Not required in simplified version.

- b) Select the site and/or the season of the year to ensure that the sun's elevation reaches an angle during the course of the day which corresponds to AM 1,5 (41,8 degrees at P_0).
- c) Mount the cavity radiometer on the sun-pointing device (item A.2.1.a). Available radiometers have their own electronic unit which shall be connected to the instrument following the manufacturer's recommendations. Allow sufficient time to stabilise the electronic unit.
- d) Mount the reference solar cell to be calibrated coplanar on the mounting platform, attaching it to the mounting block and maintain the cell temperature at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.
- e) Mount the pyranometer intended to measure diffuse solar irradiance coplanar on the mounting platform. Ensure that within the field of view of the pyranometer no reflective surfaces may influence the measurement result. Mount the shading device and ensure that the sensitive area of the pyranometer is pointed to the centre of the shade.
- f) Mount the spectroradiometer coplanar on the mounting platform.

NOTE 2 Not required in simplified version.

- g) Take simultaneous readings according to the following steps:

- 1) Ensure the alignment of all instruments with respect to the sun and the proper alignment of the shading device.
- 2) Ensure that the temperature of the reference solar cell is within the limits given in d).
- 3) Record G_{dir} , the direct normal irradiance as indicated by the cavity radiometer.
- 4) Record G_{dif} , the diffuse in-plane irradiance as indicated by the pyranometer
- 5) Record I_{SC} , the short circuit current of the reference solar cell to be calibrated
- 6) Record $E(\lambda)$, the spectral irradiance of the global natural sunlight.

NOTE 3 Not required in simplified version.

- 7) Measure θ , the solar elevation angle, or alternatively, record the hour, minute and second of the data sampling and calculate the sun's elevation.

NOTE 4 Only required in simplified version.

- 8) Record P , the local air pressure.

NOTE 5 Only required in simplified version.

- 9) Repeat Steps 1 to 6 several times.

NOTE 6 Not required in simplified version.

- 10) Repeat steps 1 to 5, 7 and 8 at least every 5 min for several hours before and after solar noon, spanning the range of air mass from below AM 1,5 to above AM 3,0 in both time periods.

NOTE 7 Only required in simplified version.

- h) Repeat the whole measurement procedure on at least two other days.

A.2.3 Data analysis

For all data points taken, apply in sequence the following steps:

- a) Reject data points where G_{dir} , G_{dif} or I_{sc} deviate by more than $\pm 3\%$ when compared to the previous data point.
- b) Calculate the total irradiance $G_T = G_{dir} + G_{dif}$.
- c) Scale the measured short circuit current I_{sc} of the reference solar cell to be calibrated to 1000 W/m^2 according to Equation A.1.
- d) Correct for temperature according to Equation A.2.

NOTE 1 This is normally not required as the temperature is maintained as described in A.2.2.d) and the allowed temperature deviation is accounted for in the uncertainty budget.

- e) Correct for spectral mismatch according to Equation A.3, where $E_m(\lambda)$ is the measured spectral irradiance of the global natural sunlight.
- f) Calculate the calibration value according to Equation A.4.
- g) Average all calibration values for one day to obtain CV_1 .
- h) Repeat steps a) to g) for the other days of measurement runs to obtain CV_2 , CV_3 , .. CV_n accordingly.
- i) Determine the arithmetic average of all n CV_i values analysed according to the above steps which yields the final calibration value for the reference device:

$$CV = (CV_1 + CV_2 + \dots + CV_n) / n. \quad (\text{A.5})$$

- j) In the simplified version the steps e) to g) are replaced as follows:

- 1) Reject data points for which the ratio G_{dif}/G_T is either smaller than 0,1 or larger than 0,3. Also reject data points where G_T is outside the range $800 - 1\,200 \text{ W/m}^2$.

NOTE 2 This to ensure that data used for the analysis are taken during atmospheric conditions close to the standard reference spectrum.

- 2) Using the sun's elevation angle and the atmospheric pressure, calculate the air mass (AM) at the moment of measurement according to:

$$AM = P / (P_0 \times \sin(\theta)) \quad (\text{A.6})$$

- 3) Reject all data samples where AM is larger than 3.
- 4) Plot the value of I_{sc} obtained after step d) versus the air mass value AM_i of each corresponding measurement sample.
- 5) By using a linear least-square technique, calculate the slope (m) and offset (b) of the best fit straight line of the data set. In order to balance the fit, all short circuit current readings should be averaged for AM bins of 0,01 before performing the fit. Both morning and afternoon have to contribute at least 33 % of the total number of measurement samples used for the Least-Squares fit.

NOTE 3 For a good straight line fit, 10 data points shall be considered as minimum. The smaller the uncertainty of the procedure, the more data points in the least-squares fit are close to AM 1,5.

NOTE 4 It is permissible to use only data from half a day. However, in the final average, at least data from three different days with at least two mornings and two afternoons have to be included.

- 6) Calculate the calibration value of the reference device by the formula:

$$CV_1 = m \times AM + b \quad \text{with } AM = 1,5 \quad (\text{A.7})$$

7) Perform steps h) and i).

A.2.4 Uncertainty estimates

In Table A.1, typical values of the uncertainty components for the global sunlight method (left column) and its simplified version (right column) are listed, resulting in combined expanded uncertainties U_{95} (with coverage factor $k = 2$) of 0,8 % and 1,1 % respectively.

Table A.1 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of global sunlight method

Uncertainty in measurement of short circuit current	0,1 %	
Uncertainty due to unstable cell temperature (± 2 K)	0,1 %	
Uncertainty of direct irradiance	0,4 %	
Uncertainty of diffuse irradiance	1,6 %	
Uncertainty of total irradiance (80 % direct and 20 % diffuse)	0,6 %	
Uncertainties due to spectral mismatch correction (IEC 60904-7) or spectral irradiance deviations between test conditions and the reference spectral irradiance of AM 1,5 (IEC 60904-3)	0,3 %	0,4 %
Variations of data on different days	0,3 %	0,8 %
Combined expanded uncertainty	0,8 %	1,1 %

A.2.5 References documents

- K.A. Emery, C.R. Osterwald, L.L. Kazmerski, and R.E. Hart, (1988c), Calibration of Primary Terrestrial Reference Cells When Compared With Primary AM0 Reference Cells, Proceedings of the 8th PV Solar Energy Conference, Florence, pp. 64-68.
- K. A. Emery, C.R. Osterwald, S. Rummel, D.R. Myers, T.L. Stoffel, and D. Waddington, “A Comparison of Photovoltaic Calibration Methods,” Proc. 9th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Freiburg, W. Germany, September 25-29, 1989, pp. 648-651.
- K.A. Emery, D. Waddington, S. Rummel, D.R. Myers, T.L. Stoffel, and C.R. Osterwald, “SERI Results from the PEP 1987 Summit Round Robin and a Comparison of Photovoltaic Calibration Methods,” SERI tech. rep. TR-213-3472, March 1989.
- Gomez, T, Garcia L, Martinez G, "Ground level sunlight calibration of space solar cells. Tenerife 99 campaign," Proc. 28th IEEE PVSC, 1332-1335, (2000).
- J. Metzdorf, T. Wittchen, K. Heidler, K. Dehne, R. Shimokawa, F. Nagamine, H. Ossenbrink, L. Fornarini, C. Goodbody, M. Davies, K. Emery, and R. Deblasio, “The Results of the PEP '87 Round-Robin Calibration of Reference Cells and Modules,- Final Report” PTB technical report PTB-Opt-31, Braunschweig, Germany, November 1990, ISBN 3-89429-067-6.
- H. Müllejans, A. Ioannides, R. Kenny, W. Zaaiman, H. A. Ossenbrink, E. D. Dunlop “Spectral mismatch in calibration of photovoltaic reference devices by global sunlight method” *Measurement Science and Technology* **16** (2005) 1250-1254.
- H. Müllejans, W. Zaaiman, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink “Calibration of photovoltaic reference cells by global sunlight method”, *Metrologia* **42** (2005) 360-367.
- H. Müllejans, W. Zaaiman, F. Merli, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink “Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells” *Progress in Photovoltaics* **13** (2005) 661-671.
- F.C. Treble and K.H. Krebs, “Comparison of European Reference Solar Cell Calibrations”, Proc. 15th IEEE PV Spec. Conf., 1981, pp. 205-210.
- R. Whitaker, G. Zerlaut, and A. Purnell, “Experimental demonstration of the efficacy of global versus direct beam use in photovoltaic performance prediction of flat plate photovoltaic modules”, Proc 16th IEEE PVSC, pp. 469-474, 1982.

A.3 Differential spectral responsivity calibration (DSR calibration)

Traceability is based on a calibration of spectral responsivity based on standard detectors directly traceable to SI units. The calibration value is computed from the measured absolute spectral responsivity of the reference cell and the reference solar spectral irradiance distribution. The spectral responsivity calibration is transferred from the standard detector irradiance level to the solar irradiance level over many orders of magnitude with no restrictions to the solar cell concerning linearity or spectral match.

A.3.1 Equipment

The following apparatus is required (see Figures A.1 and A.2)

- a) a monochromator producing chopped spectral irradiance of at least $1 \text{ mWm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ within the wavelength range covering the spectral responsivity of the reference solar cell to be calibrated, with a traceable wavelength setting;
- b) lamp(s) with lens or mirror entrance optics (recommended are quartz-halogen lamp to cover wavelengths above 400 nm; and Xenon-arc lamps for wavelengths below 400 nm);
- c) a bias light source, meeting in spectral irradiance, uniformity and temporal stability the requirements of Class CBA as defined in IEC 60904-9;
- d) a chopped monochromatic beam, traceable in its wavelength calibration, for the absolute calibration at one or more discrete wavelengths. The non-uniformity shall be smaller than $\pm 3 \%$ within the active area of the device to be calibrated;
- e) a monitor photodiode large enough to monitor the radiation power of the monochromatic beam of a) and d);
- f) standard radiation detector(s) with temperature control directly traceable to SI units. These detectors shall be of photodiodes with the best available linearity, uniformity and stability;
- g) adjustable aperture (imaged onto the reference cell);
- h) means for maintaining the temperature of the reference cell at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- i) means for measuring the AC short-circuit currents of the reference cell, the standard detector(s) and the monitoring detector, e.g. with a lock-in amplifier. The variation of the amplification factor of such amplifiers shall be less than 0,1 % over the signal ranges used. Preferably the same amplifier is used for the reference cell and the standard detector;
- j) means for measuring the DC component of the reference cell I_b as defined in step A.3.2.f.

A.3.2 Test procedure

- a) Set and maintain the temperature of the reference cell to $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.
- b) Adjust the aperture until its image coincides with the active area of the reference cell within $\pm 1 \text{ mm}$.
- c) Mount the standard detector in a position close to the focus of the monochromatic beam collecting the whole radiation power.
- d) Calibrate the monochromatic irradiance source of A.3.1.a. (without bias radiation) with respect to its relative spectral irradiance.
- e) Use its chopped monochromatic beam to determine the ratio of the AC short-circuit currents of the monitor photodiode ($\Delta I_{\text{mon,cal}}$) and standard detector (ΔI_{st}) measured simultaneously at wavelength intervals of not more than 10 nm over the whole responsivity range.
- f) Set the white bias irradiance E_b to the desired operational level (between 10 Wm^{-2} and 1 100 Wm^{-2}) and measure the corresponding DC short circuit current $I_b = I_{\text{sc}}(E_b)$.
- g) Measure the relative spectral responsivity of the reference cell by using the chopped monochromatic radiation of irradiance source A.3.1.a) and determining the ratio of the short-circuit currents of reference cell (ΔI_{ref}) and monitor photodiode (ΔI_{mon}) and calculate

the relative differential spectral responsivity $s(\lambda, I_b)_{\text{rel}}$ of the reference cell under bias irradiance E_b :

$$s(\lambda, I_b)_{\text{rel}} = \frac{\Delta I_{\text{ref}}}{\Delta I_{\text{mon}}} \cdot \frac{\Delta I_{\text{mon, cal}}}{\Delta I_{\text{st}}} \cdot S_{\text{st}}(\lambda) \quad (\text{A.8})$$

where $S_{\text{st}}(\lambda)$ = spectral responsivity of the standard detector at wavelength λ .

- h) Repeat steps f) and g) at 5 or more different bias levels covering at least the range between 10 Wm^{-2} and 1 100 Wm^{-2} , thus including a linearity test of relative spectral responsivity.
- i) With the bias irradiance set as in step f) to a low level near to or at the minimum as specified in step h), measure the absolute differential spectral responsivity of the reference cell at the 3 wavelengths of the narrowband filter set and the DC short circuit current $I_0 = I_{\text{sc}}(E_0)$. This is done by using the chopped and filtered monochromatic radiation as described in item A.3.1.d).
- j) The absolute differential spectral responsivity $s(\lambda_i, I_0)$ with $i = 1, 2, 3$ is determined by the ratio of short-circuit current to irradiance (as measured by the standard detector in the working plane) with each filter in turn.

A.3.3 Data analysis

- a) Calculate the ratio $k_i(\lambda_i)$ = (relative spectral responsivity as determined in A.3.2.g)/(absolute spectral responsivity as determined in A.3.2.i.) for each of the three wavelengths $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ under the E_0 irradiation.
- b) Compute the absolute differential spectral responsivities by scaling the relative responsivity with the mean value of the k_i determined in step a):

$$s(\lambda, I_b) = s(\lambda, I_b)_{\text{rel}} * (k_1 + k_2 + k_3)/3 \quad (\text{A.9})$$

- c) Compute the differential responsivity $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ under irradiation with $E_s(\lambda)$ for at least 5 different levels of bias light determined by I_b :

$$s_{\text{AM1.5}}(I_b) = \frac{\int s(\lambda, I_b) \cdot E_s(\lambda) \cdot d\lambda}{E_{\text{STC}}} \quad (\text{A.10})$$

with

$$E_{\text{STC}} = \int E_s(\lambda) d\lambda = 1000 \text{ Wm}^{-2} \quad (\text{A.11})$$

and

$$I_b = I_{\text{sc}}(E_b) \quad (\text{A.12})$$

- d) The reference solar cell can be considered to be linear, if the variation of $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ over ≥ 5 successive sets of measurements at different bias light levels is less than $\pm 0,5 \%$. In this case, take the mean of $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ as the definitive responsivity under STC and calculate CV:

$$CV = s_{\text{AM1.5}} E_{\text{STC}} \quad (\text{A.13})$$

- e) If the reference cell is nonlinear, it shall not serve as transfer standard for the scope of this standard.

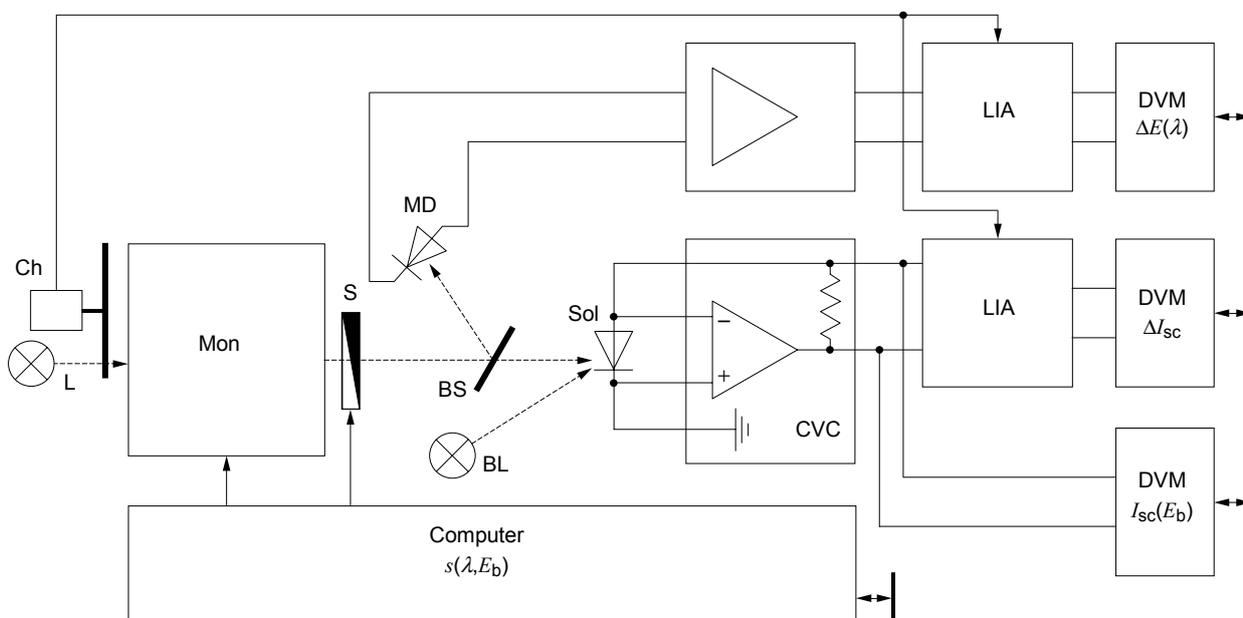
A.3.4 Uncertainty estimate

In Table A.2, typical values of the uncertainty components resulting in a combined expanded uncertainty of $U_{95} < 1 \%$ (with coverage factor $k = 2$) are summarised.

NOTE The dominant component in the uncertainty is that from the standard detector. The uncertainty quoted is not easily achieved and might only be available at some national metrology institutes (NMIs).

Table A.2 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a differential spectral responsivity calibration

Uncertainty of the standard detector(s)	< 0,5 %
Uncertainty due to nonlinear or narrow-band cells	< 0,1 %
Uncertainty due to unstable cell temperature (± 2 K)	< 0,2 %
Transfer uncertainties due to	
Relative spectral responsivity	Not applicable
Absolute spectral responsivity at discrete wavelength(s)	< 0,1 %
Spectral mismatch between bias radiation and reference solar spectrum; non-uniformity of bias radiation; non-uniformity of monochromatic radiation; mismatch of cell area and irradiated area (image of the diaphragm); spectral bandwidth (≤ 20 nm) of the monochromatic radiation; nonlinearity of the amplifiers	< 0,2 %
Combined expanded uncertainty	< 1 %



IEC 859/09

Key

Mon: monochromator, Ch: chopper, L: light source with entrance optics, S: shutter, BS: beam splitter, MD: monitor photodiode, BL: (array of) bias lamp(s), Sol: solar cell and standard detector respectively, CVC: current-voltage converter, LIA: lock-in amplifier

Figure A.1 – Block diagram of differential spectral responsivity calibration superimposing chopped monochromatic radiation $DE(I)$ and DC bias radiation E_b

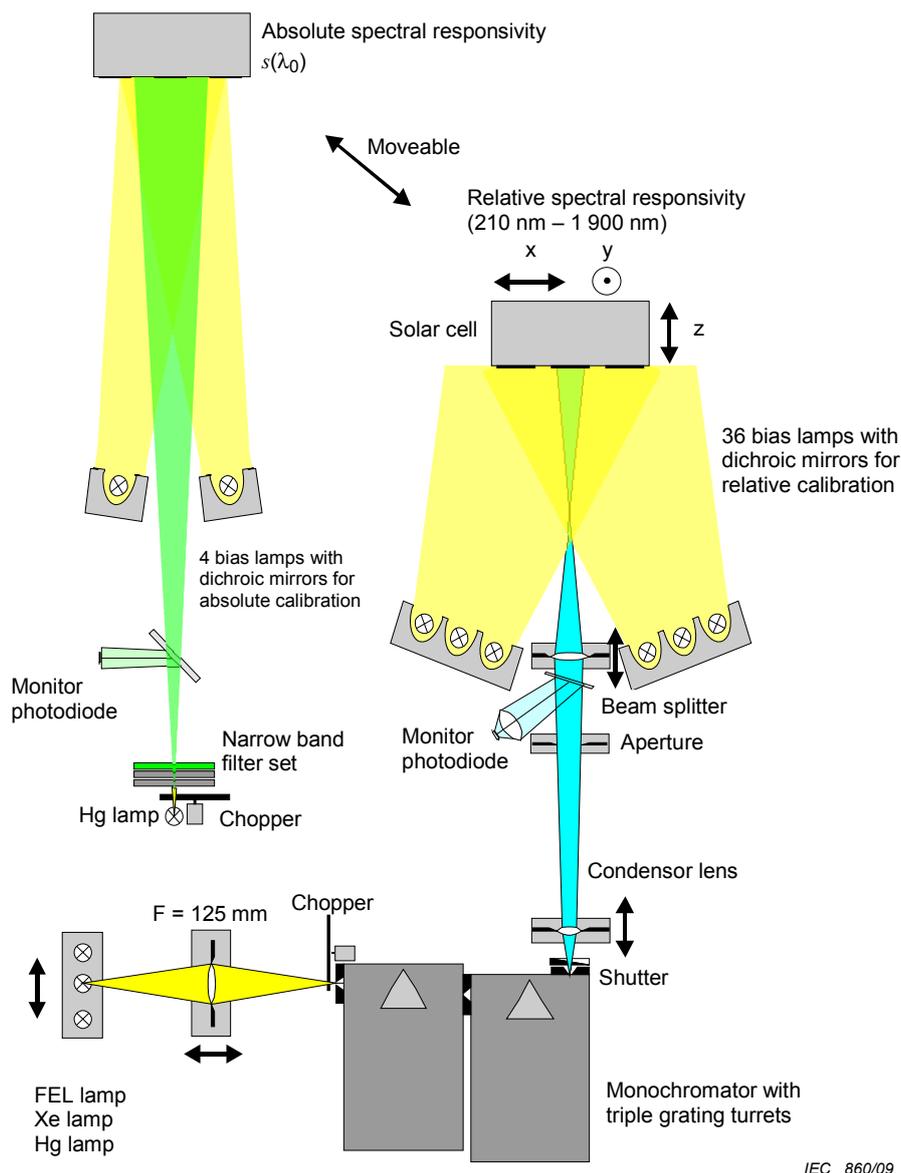


Figure A.2 – Optical arrangement of differential spectral responsivity calibration

A.3.5 References documents

- J. Metzdorf “Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method”, *Appl. Optics* **26** (9) (1987) 1701-1708.
- J. Metzdorf, S. Winter, T. Wittchen “Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values” *metrologia* **37** (2000) 573-578.
- S. Winter, T. Wittchen, J. Metzdorf “Primary Reference Cell Calibration at the PTB Based on an Improved DSR Facility” in “Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conf.”, ed. by H. Scherr, B. Mc/Velis, E. Palz, H. A. Ossenbrink, E. Dunlop, P. Helm (Glasgow 2000) James & James (Science Publ., London), ISBN 1 902916 19 0.

A.4 Solar simulator method

Traceability is based on the absolute spectral irradiance of simulated sunlight and relative spectral responsivity of the reference solar cell to be calibrated. The absolute spectral irradiance shall be measured by a spectroradiometer calibrated by standard lamps directly traceable to SI units, and the spectral responsivity shall be calibrated by standard detectors directly traceable to SI units. When traceability via WRR is required, the absolute irradiance of the solar simulator shall be measured by using a cavity radiometer traceable to WRR. The

calibration value is computed from the measured spectral responsivity of the reference cell, the spectral irradiance distribution of the solar simulator and the reference solar spectral irradiance distribution (IEC 60904-3).

A.4.1 Equipment

The following apparatus is required (see Figure A.3).

- a) A solar simulator of class AAA as defined in IEC 60904-9.
- b) A spectroradiometer as described in CIE 53-1982.
- c) Means for measuring spectral responsivity of the reference cell as defined in IEC 60904-8.
- d) A standard lamp which has been directly calibrated by the primary standard lamps, which shall be mutually recognized and authorized by CCPR/CIE.
- e) A cavity radiometer traceable to WRR whose view angle is wider than the spreading angle of the solar simulator light (optional).
- f) Means for measuring the short circuit current of the reference cell which shall comply with the general measurement requirements of IEC 60904-1.
- g) Means for maintaining the temperature of the reference cell at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.

A.4.2 Calibration procedure

- a) The relative spectral response of the reference cell shall be measured with white bias light of $1\,000\text{ Wm}^{-2}$ at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ in accordance with IEC 60904-8.
- b) The irradiance of the solar simulator in the test plane shall be set to approximately $1\,000\text{ Wm}^{-2}$, using a thermal photo detector such as thermopile.
- c) The absolute spectral irradiance distribution in the test plane shall be measured by the calibrated spectroradiometer as described in CIE 63-1984.

NOTE For the calculation as described in A.4.3 a) the wavelength range has to span at least the same interval as $S(\lambda)$. When the cavity is used as in A.4.3. b), the wavelength range of the spectral irradiance measurement must be sufficiently large to reach the desired uncertainty.

- d) The reference cell shall be located in the test plane of the simulator. The cell temperature shall be maintained at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. The short-circuit current of the cell is to be measured more than 10 times and the mean value is to be calculated.

A.4.3 Data analysis

- a) The calibration value (CV) is to be computed as follows.

$$CV = I_{\text{SC}} \frac{\int E_{\text{S}}(\lambda)S(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{m}}(\lambda)S(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A.14})$$

where:

$E_{\text{m}}(\lambda)$ is the absolute spectral irradiance distribution of the solar simulator.

- b) When direct traceability to WRR is required, the absolute irradiance of the solar simulator shall be measured by using a cavity radiometer traceable to WRR, as described in A.4.1.e). The calibration value (CV) is computed according to Equation A.4 where G_{T} is the total irradiance of the solar simulator measured by a cavity radiometer traceable to WRR.
- c) Repeating the steps in A.4.2. and A.4.3. twice, the mean CV is to be calculated as the final calibration value.

A.4.4 Uncertainty estimate

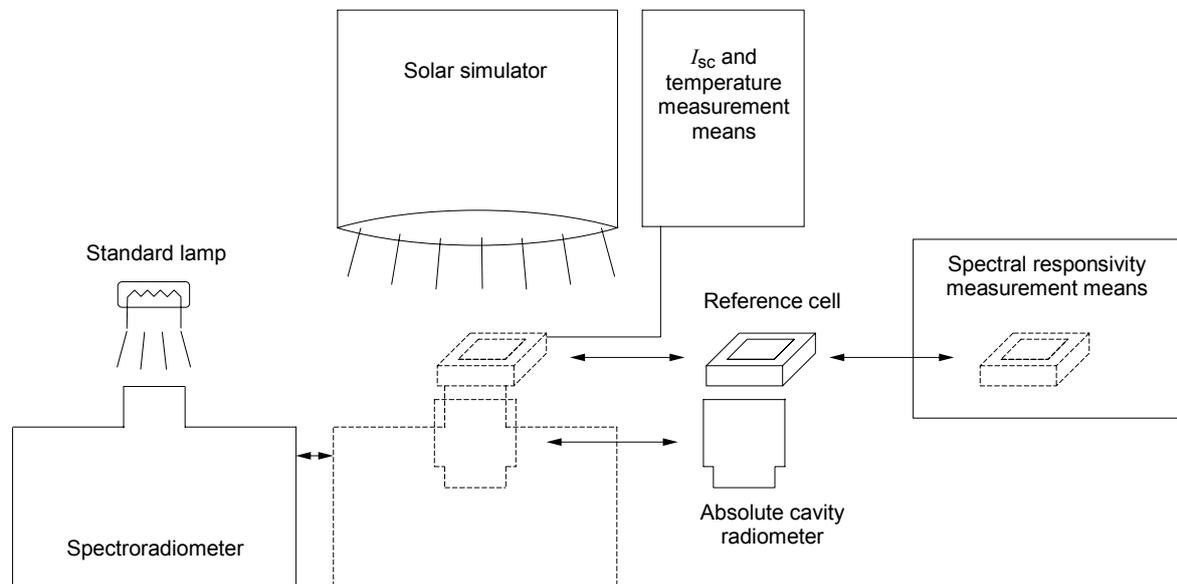
In the following Tables A.3 and A.4 typical values of the uncertainty components resulting in combined expanded uncertainty of U_{95} of 2 % and 0,6 % (with coverage factor $k = 2$) are summarized.

Table A.3 – Example of uncertainty components ($k = 2$) of a solar simulator method calibration

Uncertainty of the standard lamp:	< 2 %
Uncertainty due to spectroradiometer:	< 0,2 %
Uncertainty due to unstable cell temperature:	< 0,2 %
Transfer uncertainties due to spectral responsivity, spectral mismatch between solar simulator and reference solar spectrum:	< 0,2 %
Uncertainty due to temporal and spatial non-uniformity of solar simulator and different size and time constant of spectroradiometer and cell:	< 0,2 %
Combined expanded uncertainty	2 %

Table A.4 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a solar simulator method calibration when WRR traceable cavity radiometer is used

Uncertainty of WRR vs SI units	< 0,4 %
Uncertainty of irradiance measurement	< 0,2 %
Uncertainty due to unstable cell temperature:	< 0,2 %
Uncertainties due to spectral irradiance deviations between test conditions and the reference spectral irradiance of AM 1,5 (IEC 60904-3) or spectral mismatch correction (IEC 60904-7)	< 0,3 %
Uncertainty due to temporal and spatial non-uniformity of solar simulator and different size and time constant of spectroradiometer, cell and cavity radiometer:	< 0,2 %
Combined expanded uncertainty	0,6 %



IEC 861/09

Figure A.3 – Schematic apparatus of the solar simulator method

A.4.5 References documents

- R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa, Y. Hamakawa "Japanese indoor calibration method for the reference solar cell and comparison with outdoor calibration" *Japanese J. Appl. Phys.* **26**(1) (1987) 86-91.
- R. Shimokawa, H. Ikeda, Y. Miyake, S. Igari "Development of wide field-of-view cavity radiometer for solar simulator use and intercomparison between irradiance measurements based on the world radiometer reference and electrotechnical laboratory scales" *Japanese J. Appl. Phys.* **41** (2002) 5088-5093.

- H. Müllejans, W. Zaaiman, F. Merli, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink “Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells” *Progress in Photovoltaics* **13** (2005) 661-671.
- CIE 53-1982 “Methods of Characterizing the Performance of radiometers and Photometers”, ISBN 92 9034 053 3.
- CIE 63-1984 “The Spectroradiometric Measurement of Light Sources”.

A.5 Direct sunlight method

The reference solar cell to be calibrated is compared under direct beam natural sunlight with a reference radiometer. The establishment of traceability is based on the calibration using a pyrhelimeter measuring direct solar irradiance and traceable to the WRR. The short circuit current of the solar cell is measured, scaled to 1 000 W/m² and corrected for temperature and spectral mismatch between the direct beam natural sunlight spectrum as measured by a spectroradiometer and the defined standard spectrum (IEC 60904-3). The relative spectral response of the solar cell has also to be determined.

A.5.1 Equipment

- a) A mounting platform, which can be oriented normal to the sun within an accuracy of $\pm 0,5^\circ$ throughout the calibration run.
- b) A cavity radiometer, traceable to WRR.
- c) A collimator tube for the solar cell having the same viewing angle as the cavity radiometer.
- d) A temperature controlled mounting block for the reference cell to be calibrated capable of maintaining the junction temperature at $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ throughout all calibration runs. Means to measure the temperature of the reference solar cell to be calibrated.
- e) Traceable means to measure the short circuit current of the solar cell to an accuracy of $\pm 0,1\%$ or better.
- f) A spectroradiometer for measuring the direct normal solar spectral irradiance with the same viewing angle as the cavity radiometer.
- g) An apparatus to measure the relative spectral response of the solar cell.

A.5.2 Measurements

- a) Mount the reference cell to be calibrated with the collimator, the cavity radiometer, and the spectroradiometer coplanar on the tracking platform.
- b) Measure the relative spectral irradiance of the sun, $E_m(\lambda)$, using the spectroradiometer. During the spectral irradiance measurement, perform the following steps simultaneously:
 - 1) Measure the cavity radiometer output, G_{dir} , and verify that the total irradiance is between 750 Wm^{-2} and $1\,100\text{ Wm}^{-2}$.
 - 2) Measure the short-circuit current I_{SC} of the reference solar cell to be calibrated.
 - 3) Measure the reference cell temperature, T_j .
 - 4) Repeat these steps at least four times. These repetitions shall be distributed in time during the spectral irradiance measurement.
- c) Perform a minimum of five replications of step b) on at least three separate days.

A.5.3 Data analysis

- a) Perform the correction of Equation A.1, where G_T is the reading of the cavity radiometer representing the direct irradiance G_{dir} .
- b) Average the calibration values from a) for each measurement of spectral irradiance.
- c) Extend the measured spectral irradiance to the range 300-4 000 nm according to reference documents to encompass the limits of the standard spectrum (IEC 60904-3).

- d) Correct each result of step b) for temperature using Equation A.2 and then for spectral effects according to Equation A.3 where $E_m(\lambda)$ is the direct beam solar spectral irradiance, giving the CV according to Equation A.4.
- e) Average the calibration values for each day and calculate the arithmetic average CV using Equation A.5.
- f) Reject any points that meet the following criteria
 - 1) CV_i more than 1,5 % from the CV;
 - 2) I_{SC} range is greater than 1,5 %;
 - 3) $CV_i(T_j)$ standard deviation is > 1 %.
- g) Verify that at least 3 days data with a minimum of 5 sets per day of valid data exist. If not take additional measurements until this criterion is met.

A.5.4 Uncertainty estimate

In Table A.5, typical values of the uncertainty components for the direct sunlight method are listed, resulting in combined expanded uncertainty U_{95} (with coverage factor $k = 2$) of 0,9 %.

Table A.5 – Typical uncertainty components ($k = 2$) of a direct sunlight method

Uncertainty of WRR vs SI units	0,4 %
Measured direct irradiance	0,2 %
Spectral mismatch correction	0,8 %
Uncertainty due to cell temperature correction	0,2 %
Combined expanded uncertainty	0,9 %

A.5.5 References documents

- C.R. Osterwald, K.A. Emery, D.R. Myers, R.E. Hart “Primary reference cell calibrations at SERI: History and methods” Proc. 21st IEEE PVSC Orlando, FL, May 21-25 1990, 1062-1067.
- K.A. Emery, C.R. Osterwald, L.L. Kazmerski, R.E. Hart “Calibration of primary terrestrial reference cells when compared with primary AM0 reference cells” Proc. 8th European PVSEC, Florence, Italy, May 9-12 1988 p. 64-68.
- C. Osterwald, K. Emery "Spectroradiometric Sun Photometry" *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **17** (200) 1171-1188.
- ASTM E 1125 “Standard test method for calibration of primary non-concentrator terrestrial photovoltaic reference cells using a tabular spectrum”.

Bibliography

IEC 60891, *Procedures for temperature and irradiance corrections to measure I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*

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

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-8, *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

IEC 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

NIST Technical Note 1297:1994, *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurements Results*

The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, United Kingdom, Accreditation Service, M3003, Middlesex, UK, December 1997

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	27
1 Domaine d'application et objet.....	29
2 Références normatives.....	29
3 Termes et définitions.....	29
4 Exigences relatives aux procédures d'étalonnage traçables des dispositifs solaires PV de référence.....	31
5 Analyse de l'incertitude.....	32
6 Rapport d'étalonnage.....	32
7 Marquage.....	33
Annexe A (informative) Exemples de procédures d'étalonnage validées.....	34
Bibliographie.....	50
Figure 1 – Schéma des appareils de référence les plus courants et méthodes habituelles de transfert utilisées dans les chaînes de traçabilité, pour les détecteurs d'éclairement solaire.....	31
Figure A.1 – Schéma synoptique de l'étalonnage par sensibilité spectrale différentielle avec superposition d'un rayonnement monochromatique haché $DE(l)$ et d'un rayonnement de polarisation E_p	43
Figure A.2 – Montage optique pour étalonnage par sensibilité spectrale différentielle.....	44
Figure A.3 – Appareillage schématique relatif à la méthode du simulateur solaire.....	47
Tableau 1 – Exemples d'appareils de référence utilisés dans une chaîne de traçabilité du temps et de l'éclairement énergétique solaire.....	31
Tableau A.1 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives à la méthode sous lumière solaire globale.....	39
Tableau A.2 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) d'un étalonnage par sensibilité spectrale différentielle.....	43
Tableau A.3 – Exemple de composantes de l'incertitude ($k = 2$) relatives à un étalonnage par la méthode du simulateur solaire.....	46
Tableau A.4 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives à un étalonnage par la méthode du simulateur solaire, en utilisant un radiomètre à cavité traçable par rapport à la WRR.....	46
Tableau A.5 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives à la méthode de la lumière solaire directe.....	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

**Partie 4: Dispositifs solaires de référence –
Procédures pour établir la traçabilité de l'étalonnage**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60904-4 a été établie par le comité d'études 82 de la CEI: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
82/533/CDV	82/561/RVC

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60904, présentées sous le titre général *Dispositifs photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 4: Dispositifs solaires de référence – Procédures pour établir la traçabilité de l'étalonnage

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 60904 fixe les exigences relatives aux procédures d'étalonnage, dans le but d'établir la traçabilité des dispositifs solaires photovoltaïques de référence en unités SI, comme cela est stipulé par la CEI 60904-2.

La présente norme s'applique aux dispositifs solaires photovoltaïques (PV) de référence utilisés pour mesurer l'éclairement énergétique de la lumière solaire naturelle ou simulée, afin de quantifier les performances des dispositifs PV. L'utilisation d'un dispositif solaire PV de référence est requise lors de l'application des CEI 60904-1 et CEI 60904-3.

La présente norme a été écrite en faisant l'hypothèse de dispositifs solaires PV de référence à jonction unique, en particulier au silicium cristallin. Cependant, la majeure partie de la norme est suffisamment générale pour inclure d'autres technologies. Toutefois, les méthodes décrites en Annexe A sont limitées aux technologies à jonction unique.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60904-2, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 2: Exigences relatives aux dispositifs solaires de référence*

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

ISO 9059, *Energie solaire – Etalonnage des pyréliomètres de terrain par comparaison à un pyréliomètre de référence*

ISO 9846, *Energie solaire – Etalonnage d'un pyranomètre utilisant un pyréliomètre*

Guide ISO/CEI 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

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

NOTE Les différents appareils de référence concernant la chaîne de traçabilité de l'éclairement énergétique solaire sont définis ci-après. Le Tableau 1 énumère ces appareils et les compare à ceux utilisés pour la mesure du temps. La Figure 1 représente schématiquement les chaînes de traçabilité les plus courantes, basées sur les méthodes décrites en Annexe A.

3.1

étalon primaire

dispositif implémentant physiquement une des unités SI ou des grandeurs qui y sont directement reliées. Ils sont habituellement maintenus par les instituts nationaux de métrologie (INM) ou par des organisations similaires qui ont la responsabilité de l'entretien des étalons relatifs aux grandeurs physiques. Souvent également désignée par le seul terme "primaire", l'implémentation physique est choisie de telle sorte que la stabilité à long terme, la précision et la répétabilité de la mesure de la grandeur qu'il représente soient garanties aussi largement que possible par la technologie actuelle.

NOTE La Référence radiométrique mondiale (WRR ou World Radiometric Reference), représentée par le Groupe étalon mondial (WSG ou World Standard Group) composé de radiomètres à cavité, est l'étalon primaire admis pour la mesure de l'éclairement énergétique solaire.

3.2

étalon secondaire

dispositif, qui par comparaison périodique avec l'étalon primaire, sert à maintenir la conformité, en unités SI, en d'autres lieux que celui où se trouve l'étalon primaire. Il n'emploie pas nécessairement les mêmes principes techniques que l'étalon primaire, mais s'efforce d'obtenir une stabilité à long terme, une précision et une répétabilité similaires.

NOTE Les étalons secondaires types pour l'éclairement énergétique solaire sont les radiomètres à cavité, qui participent périodiquement (normalement tous les 5 ans) à la comparaison internationale des pyréliomètres (IPC ou International Pyrheliometer Comparison) avec le WSG.

3.3

référence primaire

appareil de référence qu'un laboratoire utilise pour étalonner des références secondaires. Il est comparé, périodiquement, à un étalon secondaire. Les références primaires peuvent souvent être réalisées à des coûts bien inférieurs à ceux des étalons secondaires.

NOTE Généralement, une cellule solaire est utilisée comme dispositif solaire de référence pour la mesure de l'éclairement énergétique solaire naturel ou simulé.

3.4

référence secondaire

dispositif de mesure utilisé pour les mesures de routine quotidiennes ou pour étalonner des références de travail, lui-même étalonné périodiquement avec une référence primaire.

NOTE Les références secondaires les plus courantes destinées à la mesure de l'éclairement énergétique solaire naturel ou simulé sont les cellules solaires et les modules solaires.

3.5

traçabilité

exigence, pour tout dispositif solaire PV de référence, de lier sa valeur d'étalonnage en unités SI dans une chaîne ininterrompue et documentée de transferts d'étalonnage, comprenant les incertitudes établies.

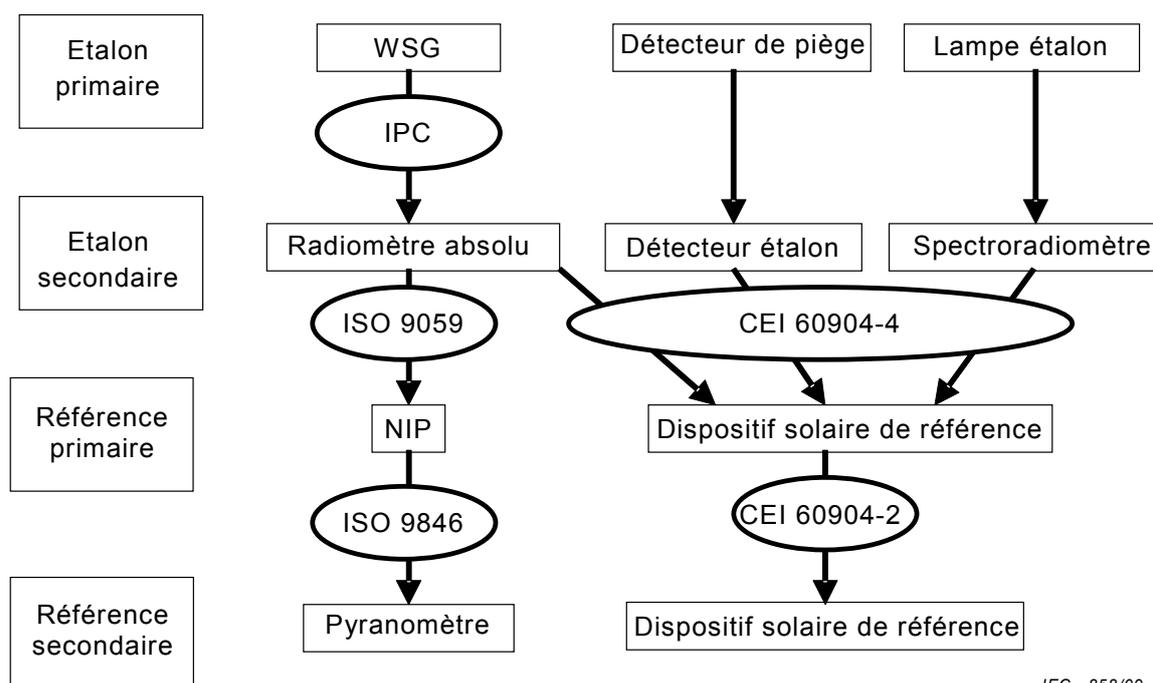
NOTE La WRR a été comparée deux fois à l'échelle radiométrique SI et a montré qu'elle était à l'intérieur de leurs niveaux mutuels d'incertitude. Par conséquent, la traçabilité par rapport à la WRR donne automatiquement la traçabilité en unités SI. Cependant, l'incertitude du rapport WRR/unités SI demande à être prise en considération. Le centre mondial de rayonnements (WRC ou World Radiation Center) recommande une répartition rectangulaire de l'incertitude avec une demi-largeur à 0,3 %. Une troisième comparaison est actuellement en cours et il convient qu'elle soit publiée prochainement.

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **28** (1991) 125-8

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **32** (1995/1996) 523-4

Tableau 1 – Exemples d'appareils de référence utilisés dans une chaîne de traçabilité du temps et de l'éclairement énergétique solaire

Appareil de référence	Temps	Éclairement énergétique solaire
Étalon primaire	Horloge atomique au césium de l'institut national de métrologie (INM)	Groupe de radiomètres à cavité constituant le Groupe étalon mondial (WSG) de la Référence radiométrique mondiale (WRR). Détecteur de piège cryogénique. Lampe étalon.
Étalon secondaire	Horloge atomique au césium des satellites GPS (Global Positioning System)	Radiomètres à cavité disponibles dans le commerce comparés tous les 5 ans, selon la comparaison internationale des pyréliomètres (IPC). Détecteur étalon, étalonné par rapport à un détecteur de piège. Spectroradiomètre étalonné par rapport à une lampe étalon.
Référence primaire	Récepteur de GPS, appareil donnant l'heure	Pyréliomètre à incidence normale (NIP – Normal Incidence Pyrheliometer) (ISO 9059) Dispositif solaire de référence (CEI 60904-2 et CEI 60904-4)
Référence secondaire	Montre à quartz	Pyranomètre (ISO 9846) Dispositif solaire de référence (CEI 60904-2)



NOTE La traçabilité directe des radiomètres absolus par rapport à l'échelle radiométrique SI peut également être disponible.

Figure 1 – Schéma des appareils de référence les plus courants et méthodes habituelles de transfert utilisées dans les chaînes de traçabilité, pour les détecteurs d'éclairement solaire

4 Exigences relatives aux procédures d'étalonnage traçables des dispositifs solaires PV de référence

Une procédure d'étalonnage traçable est nécessaire pour transférer l'étalonnage d'un étalon ou d'une référence mesurant l'éclairement énergétique solaire (tel qu'un radiomètre à cavité,

un pyréliomètre et un pyranomètre) à un dispositif solaire PV de référence. Les exigences relatives à ces procédures sont les suivantes:

- a) Tout appareil de mesure nécessaire et utilisé dans la procédure de transfert doit être un appareil dont la chaîne de traçabilité est ininterrompue.
- b) Une analyse d'incertitude documentée.
- c) Une répétabilité documentée, comme des résultats de mesure d'intercomparaison de laboratoires, ou des documents de contrôle qualité de laboratoires.
- d) Une précision absolue inhérente, donnée par un nombre limité de transferts intermédiaires.

NOTE 1 Normalement, le transfert devrait être fait d'un étalon secondaire à une cellule solaire PV de référence, constituant une référence primaire.

NOTE 2 Le transfert d'un dispositif solaire de référence à l'autre est couvert par la CEI 60904-2.

5 Analyse de l'incertitude

Une évaluation de l'incertitude, réalisée conformément au document MISC UNCERT – ED. 1.0 (1995-01), doit être fournie pour chaque procédure d'étalonnage traçable. Cette évaluation doit fournir des informations sur l'incertitude de la procédure d'étalonnage, ainsi que des données quantitatives relatives aux facteurs d'incertitude suivants, pour chaque appareil utilisé pour exécuter la procédure d'étalonnage. En particulier:

- a) La composante de l'incertitude résultant des effets aléatoires (Type A).
- b) La composante de l'incertitude résultant des effets systématiques (Type B).

Néanmoins, une analyse complète de l'incertitude est à réaliser pour la mise en œuvre de la méthode d'étalonnage par un laboratoire particulier.

6 Rapport d'étalonnage

Le rapport d'étalonnage doit être conforme aux exigences de l'ISO/CEI 17025 et doit généralement inclure au moins les informations suivantes:

- a) le titre (par exemple, "Certificat d'étalonnage");
- b) le nom et l'adresse du laboratoire, et du lieu où les essais et/ou les étalonnages ont été effectués, s'ils sont différents de l'adresse du laboratoire;
- c) l'identification unique du rapport (telle que le numéro de série) et de chaque page, le nombre total de pages et la date d'émission;
- d) le nom et l'adresse du client qui a passé la commande;
- e) la description et l'identification non ambiguë de la ou des unités soumises aux essais ou étalonnées;
- f) la date de réception de la ou des unités d'étalonnage et la ou les dates d'essai ou d'étalonnage, s'il y a lieu;
- g) les résultats de l'étalonnage, y compris la température du dispositif sur lequel l'étalonnage a été réalisé;
- h) la référence aux procédures d'échantillonnage employées par le laboratoire, lorsque celles-ci sont pertinentes vis-à-vis de la validité ou de l'application des résultats;
- i) le ou les noms, le ou les titres et la ou les signatures, ou une identification équivalente de la ou des personnes autorisant la publication du rapport;
- j) le cas échéant, une indication selon laquelle les résultats ne se rapportent qu'aux unités soumises aux essais ou étalonnées.

7 Marquage

Le dispositif solaire de référence étalonné doit être identifié par un numéro de série ou par un numéro de référence, et les informations suivantes doivent être jointes ou fournies sur un certificat l'accompagnant:

- a) date de l'étalonnage (déjà réalisé ou actuel);
- b) valeur d'étalonnage et de son coefficient de température (le cas échéant).

Annexe A (informative)

Exemples de procédures d'étalonnage validées

A.1 Généralités

La présente annexe décrit des exemples de procédures d'étalonnage applicables à des cellules solaires PV de référence, en tant que dispositifs de référence primaire, ainsi que leurs incertitudes déclarées. Ces procédures ont pour but d'établir la traçabilité des dispositifs solaires de référence en unités SI, comme cela est demandé par la CEI 60904-2. Les dispositifs de référence primaire, étalonnés conformément à ces procédures, servent à établir la traçabilité d'autres dispositifs solaires PV de référence.

Comme déjà mentionné à l'Article 1, les méthodes décrites dans la présente annexe sont limitées aux technologies PV à jonction unique. D'ailleurs, elles n'ont été actuellement validées que pour la technologie au silicium cristallin, bien qu'il convient qu'elles soient applicables à d'autres technologies.

Les méthodes ont été appliquées dans divers laboratoires dans le monde et validées par des intercomparaisons internationales, notamment le World Photovoltaic Scale (WPVS). Toutefois, la description donnée par la présente norme est plus générale. Pour prendre connaissance des détails des diverses implémentations, les références des publications contrôlées par des pairs sont données à la fin de chaque procédure.

Les estimations de l'incertitude sont basées sur U_{95} (facteur de couverture $k = 2$) pour toutes les composantes individuelles. L'incertitude combinée élargie est calculée comme étant la racine carrée de la somme des carrés de toutes les composantes. Les incertitudes données sont des expressions simplifiées (limitées aux composantes principales) telles que fournies par les laboratoires ayant appliqué la procédure. Ces calculs d'incertitude servent de lignes directrices et devront être adaptés à la mise en œuvre particulière de chaque procédure dans un laboratoire donné. Les incertitudes obtenues par la mise en œuvre de ces méthodes pourraient être très différentes. Les incertitudes estimées doivent être basées sur une analyse explicite et ne peuvent pas être prises par référence aux estimations d'incertitude de la présente norme.

A.1.1 Exemples des méthodes validées

- A.2 Méthode sous lumière solaire globale
- A.3 Etalonnage par sensibilité spectrale différentielle
- A.4 Méthode du simulateur solaire
- A.5 Méthode de la lumière solaire directe

A.1.2 Liste des symboles communs

I_{SC}	courant de court-circuit de la cellule de référence
T_j	température de la cellule de référence
M_G	facteur de correction de l'éclairement énergétique (voir ci-dessous)
M_T	facteur de correction de la température (voir ci-dessous)
T_{coef}	coefficient α de température du courant de court-circuit (CEI 60891) normalisé au courant de court-circuit à 25 °C et exprimé en 1/°C
MMF	facteur de désadaptation (voir ci-dessous)
λ	longueur d'onde
$S(\lambda)$	réponse spectrale de la cellule de référence
$s(\lambda)$	sensibilité spectrale différentielle de la cellule de référence
$E_m(\lambda)$	répartition spectrale de l'éclairement énergétique de la lumière solaire naturelle ou simulée

$E_s(\lambda)$	répartition spectrale de l'éclairement énergétique de référence ou normalisé selon la CEI 60904-3
G_{dir}	éclairement énergétique direct
G_{dif}	éclairement énergétique diffus dans le plan
G_T	éclairement énergétique total dans le plan
E_{STC}	éclairement énergétique aux conditions normales d'essai (= 1 000 Wm ⁻²)
CV	valeur d'étalonnage, c'est-à-dire I_{SC} aux conditions normales d'essai
AM	masse d'air (masse atmosphérique)
STC	conditions normales d'essai (1 000 W/m ² , 25 °C et $E_s(\lambda)$)
P	pression atmosphérique locale
P_0	101 300 Pa
θ	angle d'élévation du soleil

A.1.3 Equations communes

Les méthodes décrites dans les Articles A.2, A.4 et A.5 ont certains calculs en commun exposés ici. Les détails des diverses implémentations sont ensuite décrits dans chaque paragraphe.

Le courant I_{SC} n'est généralement pas mesuré à exactement 1 000 Wm⁻², mais à un niveau d'éclairement énergétique proche. En prenant pour hypothèse que le courant I_{SC} de la cellule de référence varie linéairement avec l'éclairement énergétique, on fait la correction suivante:

$$I_{SC}(1000 \text{ Wm}^{-2}) = I_{SC} M_G = I_{SC} \frac{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{G_T} \quad (\text{A.1})$$

Les conditions normales d'essai (STC) stipulent une température du dispositif de 25 °C, mais les mesures ne seront pas toujours effectuées à cette température. Il convient de prendre en compte les écarts de température dans le bilan de l'incertitude. Il est aussi possible de corriger le courant I_{SC} de la température de mesure T_j à la température de 25 °C, en le multipliant par le facteur de correction de la température M_T défini par:

$$I_{SC}(25 \text{ °C}) = I_{SC}(T_j) M_T = \frac{I_{SC}(T_j)}{1 - T_{coef}(25 \text{ °C} - T_j)} \quad (\text{A.2})$$

La correction de la différence entre la sensibilité spectrale de la cellule de référence à étalonner et celle du dispositif utilisé pour mesurer l'éclairement énergétique, peut être représentée par le facteur de désadaptation, MMF:

$$MMF = \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_m(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} E_m(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} E_s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (\text{A.3})$$

NOTE Le domaine d'intégration considéré est basé sur la définition de $E_s(\lambda)$. Si le domaine de mesure, en particulier celui de $E_m(\lambda)$, ne couvre pas totalement ce domaine, une approximation, une extrapolation ou une modélisation appropriée peut être utilisée, mais il est nécessaire de l'expliquer dans le calcul de l'incertitude.

La valeur d'étalonnage, CV, de la cellule de référence est alors calculée comme étant:

$$CV = I_{SC} M_G M_T MMF \quad (\text{A.4})$$

A.1.4 Documents de référence

- C. R. Osterwald et al. "The results of the PEP'93 intercomparison of reference cell calibrations and newer technology performance measurements: Final Report", NREL/TP-520-23477 (1998) 209 pages.
- C. R. Osterwald et al. "The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program", *Progress in Photovoltaics* 7 (1999) 287-297.
- K. Emery "The results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration", NREL/TP-520-27942 (2000) 14 pages.
- Winter et al.: "The results of the Second World Photovoltaic Scale Recalibration", Proc. of the 31st IEEE PVSC 3-7 January 2005, Orlando, Florida, USA, pp. 1011-1014.

A.2 Méthode sous lumière solaire globale (Global sunlight method)

L'établissement de la traçabilité est basé sur l'étalonnage utilisant la méthode "Continuous Sun-and-Shade" telle que décrite dans l'ISO 9846. La cellule solaire de référence à étalonner est comparée, sous la lumière solaire naturelle, à deux radiomètres de référence, à savoir un pyréliomètre mesurant l'éclairement énergétique solaire direct et un pyranomètre mesurant l'éclairement énergétique solaire diffus par application d'un dispositif continu de masquage dans des conditions normales d'incidence. L'éclairement énergétique solaire total est déterminé par la somme de l'éclairement énergétique direct et de l'éclairement énergétique diffus dans le plan. Un étalon secondaire est utilisé comme pyréliomètre; il est constitué d'un radiomètre absolu à cavité, comparé tous les cinq ans au Groupe étalon mondial (WSG) établissant la Référence radiométrique mondiale (WRR). Le facteur d'étalonnage relatif à la cellule photovoltaïque de référence est déterminé à partir du courant de court-circuit mesuré, normalisé à 1 000 W/m² et corrigé de la désadaptation spectrale (CEI 60904-7) basée sur l'éclairement énergétique spectral mesuré de la lumière solaire globale et sur la réponse spectrale relative de la cellule solaire de référence à étalonner.

Dans certaines conditions, la méthode simplifiée sous lumière solaire globale (Simplified Global Sunlight Method) est applicable. Le courant de court-circuit de la cellule de référence est mesuré à 1 000 W/m² et ensuite reporté sur un graphique en fonction de la pression corrigée de la masse d'air géométrique. La valeur d'étalonnage est déterminée à partir d'un ajustement linéaire des moindres carrés à la masse d'air 1,5. Une correction de désadaptation spectrale n'est pas demandée et, par conséquent, les mesures de l'éclairement énergétique spectral de la lumière solaire et de la réponse spectrale ne sont pas nécessaires. Dans la version simplifiée de la méthode sous lumière solaire globale, aucune correction de désadaptation spectrale explicite n'est réalisée; elle est remplacée par des conditions pour lesquelles il convient de garantir que l'éclairement énergétique spectral de la lumière solaire naturelle est suffisamment proche de l'éclairement spectral normal (CEI 60904-3), dont la composante de l'incertitude est inférieure à celle qui est mentionnée dans le Tableau A.1. Bien qu'il convienne que ceci soit assuré du fait des conditions énumérées ci-dessous par la description de la méthode, il est recommandé de le vérifier explicitement (préférentiellement en employant la méthode sous lumière solaire globale). Après cette validation, la version simplifiée peut être appliquée tant que les conditions aux limites sont identiques à celles présentes pendant la validation.

NOTE 1 La vérification et la validation produiront des valeurs numériques pour les deux méthodes. Si la concordance entre ces valeurs numériques est dans le bilan d'incertitude des méthodes, la méthode simplifiée doit être considérée comme étant validée.

NOTE 2 La procédure simplifiée donne des résultats précis pour des dispositifs dont la réponse spectrale s'étend sur un large domaine du spectre solaire, par exemple les dispositifs au silicium cristallin. Des erreurs significatives peuvent être introduites pour les dispositifs à réponse spectrale étroite.

A.2.1 Equipements

- a) Une plateforme support, pouvant être orientée perpendiculairement au soleil avec une exactitude de $\pm 0,5^\circ$ dans toute la séquence d'étalonnage.
- b) Un radiomètre à cavité, traçable par rapport à la WRR.
- c) Un pyranomètre, traçable par rapport à la WRR.

- d) Un dispositif de masquage pour produire de l'ombre sur l'équipement du point c). L'angle de champ, l'angle de vision et l'angle d'ouverture causés par le masque doivent compenser les angles descriptifs respectifs du radiomètre à cavité du point b).
- e) Un bloc support à température contrôlée pour le dispositif de référence en essai, capable de maintenir une température de cellule de (25 ± 2) °C pendant toutes les séquences d'étalonnage.
- f) Des moyens de mesure traçables pour mesurer le courant de court-circuit de la cellule solaire, avec une exactitude de $\pm 0,1$ % ou mieux.
- g) Des moyens de mesure traçables pour mesurer le signal du pyranomètre, avec une exactitude de $\pm 0,5$ % ou mieux.
- h) Un spectroradiomètre capable de mesurer l'éclairement énergétique spectral de la lumière solaire naturelle dans la totalité du plan, dans la gamme des longueurs d'onde de 350 – 2 500 nm (ou supérieure).

NOTE 1 Non requis dans la version simplifiée.

- i) Un appareil pour déterminer la réponse spectrale relative de la cellule solaire de référence.

NOTE 2 Non requis dans la version simplifiée.

- j) Des moyens pour mesurer l'élévation du soleil avec une précision de $\pm 2^\circ$. Sinon, l'élévation du soleil pendant l'échantillonnage des données peut être tirée des éphémérides, ou être calculée, dans la mesure où l'exigence de précision est satisfaite pendant l'échantillonnage des données. Ce dernier nécessite généralement des moyens de mesure traçables du temps pour le calcul de la masse d'air.

NOTE 3 N'est requis que dans la version simplifiée.

- k) Un manomètre pour mesurer la pression atmosphérique locale P avec une exactitude de ± 250 Pa ou mieux.

NOTE 4 N'est requis que dans la version simplifiée.

A.2.2 Mesurage

Conformément à la présente norme, un étalonnage ne doit être effectué que les jours clairs et ensoleillés, sans couverture nuageuse à moins de 30 degrés du soleil.

- a) Déterminer la réponse spectrale relative de la cellule de référence à étalonner.

NOTE 1 Non requis dans la version simplifiée.

- b) Choisir le site et/ou la saison de l'année pour être sûr que l'élévation du soleil atteint un angle, pendant le jour, qui correspond à AM 1,5 (41,8 degrés à P_0).
- c) Monter le radiomètre à cavité sur le dispositif de pointage vers le soleil (point A.2.1.a). Les radiomètres disponibles possèdent leur propre unité électronique, devant être connectée à l'équipement suivant les recommandations du fabricant. Octroyer un temps suffisant pour laisser se stabiliser l'unité électronique.
- d) Monter la cellule solaire de référence à étalonner, coplanaire sur la plateforme support, la fixer au bloc support et maintenir la température de la cellule à (25 ± 2) °C.
- e) Monter le pyranomètre, prévu pour mesurer l'éclairement énergétique solaire diffus, coplanaire sur la plateforme support. S'assurer que, dans le champ de vision du pyranomètre, aucune surface réfléchissante ne peut influencer le résultat de mesure. Monter le dispositif de masquage et s'assurer que la zone sensible du pyranomètre est pointée vers le centre de l'ombre.
- f) Monter le spectroradiomètre coplanaire sur la plateforme support.

NOTE 2 Non requis dans la version simplifiée.

- g) Faire des relevés simultanés, conformément aux étapes suivantes:

- 1) S'assurer de l'alignement de tous les appareils par rapport au soleil et de l'alignement approprié du dispositif de masquage.

- 2) S'assurer que la température de la cellule solaire de référence est dans les limites indiquées au point d).
- 3) Relever G_{dir} , l'éclairement énergétique normal direct, comme indiqué par le radiomètre à cavité.
- 4) Relever G_{dif} , l'éclairement énergétique diffus dans le plan, comme indiqué par le pyranomètre.
- 5) Relever I_{SC} , le courant de court-circuit de la cellule solaire de référence à étalonner.
- 6) Relever $E(\lambda)$, l'éclairement énergétique spectral de la lumière solaire naturelle globale.

NOTE 3 Non requis dans la version simplifiée.

- 7) Mesurer θ , l'angle d'élévation du soleil, ou sinon, relever l'heure, la minute et la seconde du lieu de l'échantillonnage des données et calculer l'élévation du soleil.

NOTE 4 N'est requis que dans la version simplifiée.

- 8) Relever P, la pression atmosphérique locale.

NOTE 5 N'est requis que dans la version simplifiée.

- 9) Répéter les étapes 1 à 6, plusieurs fois.

NOTE 6 Non requis dans la version simplifiée.

- 10) Répéter les étapes 1 à 5, 7 et 8, au moins toutes les 5 min pendant plusieurs heures, avant et après le zénith, en couvrant la plage de masse d'air de moins de AM 1,5 à plus de AM 3,0 en deux périodes de temps.

NOTE 7 N'est requis que dans la version simplifiée.

- h) Répéter la totalité de la procédure de mesure sur au moins deux autres jours.

A.2.3 Analyse des données

Pour tous les points de données considérés, appliquer dans l'ordre les étapes suivantes:

- a) Éliminer les points de données pour lesquels G_{dir} , G_{dif} ou I_{sc} s'écartent de plus de ± 3 % du point de données précédent.
- b) Calculer l'éclairement énergétique total $G_T = G_{dir} + G_{dif}$.
- c) Réduire le courant de court-circuit mesuré, I_{sc} , de la cellule solaire de référence à étalonner à $1\ 000\ \text{W/m}^2$, conformément à l'Equation A.1.
- d) Appliquer la correction de température conformément à l'Equation A.2.

NOTE 1 Ceci n'est généralement pas requis du fait que la température est maintenue comme cela est décrit en A.2.2.d) et que l'écart de température admis est pris en compte par le bilan de l'incertitude.

- e) Appliquer la correction de désadaptation spectrale conformément à l'Equation A.3, où $E_m(\lambda)$ est l'éclairement énergétique spectral mesuré de la lumière solaire naturelle globale.
- f) Calculer la valeur d'étalonnage conformément à l'Equation A.4.
- g) Faire la moyenne de toutes les valeurs d'étalonnage sur un jour, pour obtenir CV_1 .
- h) Répéter les étapes a) à g) pour les autres jours qui ont donné lieu à des séquences de mesure pour obtenir de la même manière CV_2, CV_3, \dots, CV_n .
- i) Déterminer la moyenne arithmétique des n valeurs de CV_i ($i = 1$ à n) analysées conformément aux étapes ci-dessus; elle donne la valeur finale d'étalonnage pour le dispositif de référence:

$$CV = (CV_1 + CV_2 + \dots + CV_n) / n. \quad (\text{A.5})$$

- j) Dans la version simplifiée, les étapes e) à g) sont remplacées comme suit:

- 1) Éliminer les points de données pour lesquels le rapport G_{dif}/G_T est inférieur à 0,1 ou supérieur à 0,3. En outre, éliminer les points de données où G_T est en dehors de la plage $800 - 1\ 200\ \text{W/m}^2$.

NOTE 2 Ceci pour s'assurer que les données utilisées pour l'analyse sont prélevées pendant des conditions atmosphériques proches de celles du spectre de référence normalisé.

- 2) En utilisant l'angle d'élévation du soleil et la pression atmosphérique, calculer la masse d'air (AM) au moment de la mesure, conformément à:

$$AM = P / (P0 \times \sin(\theta)) \quad (\text{A.6})$$

- 3) Eliminer tous les échantillons de données pour lesquels AM est supérieur à 3.
- 4) Tracer la valeur de I_{sc} obtenue après l'étape d) en fonction de la valeur de la masse d'air, AM_i , de chaque échantillon de mesure correspondant.
- 5) En utilisant une technique linéaire des moindres carrés, calculer la pente (m) et le décalage (b) de la ligne droite ajustée au mieux par rapport à l'ensemble des données. Afin d'équilibrer l'ajustement, il convient de faire la moyenne de tous les relevés de courant de court-circuit pour des tranches d'échantillonnage de masse d'air (AM) de 0,01, avant de réaliser l'ajustement. Ensemble, le matin et l'après-midi doivent contribuer à hauteur d'au moins 33 % au nombre total d'échantillons de mesure utilisés pour l'ajustement par la méthode des moindres carrés.

NOTE 3 Pour obtenir un bon ajustement de la ligne droite, 10 points de données doivent être considérés au minimum. L'incertitude de la procédure est d'autant plus petite qu'il y a plus de points de données proches de AM 1,5 dans l'ajustement des moindres carrés.

NOTE 4 Il est admissible de n'utiliser que les données d'une demi-journée. Cependant, dans la moyenne finale, les données de trois jours différents avec au moins deux matins et deux après-midi, doivent être incluses.

- 6) Calculer la valeur d'étalonnage du dispositif de référence par la formule:

$$CV_1 = m \times AM + b \quad \text{with } AM = 1,5 \quad (\text{A.7})$$

- 7) Effectuer les étapes h) et i).

A.2.4 Estimations de l'incertitude

Dans le Tableau A.1 suivant, les valeurs types des composantes de l'incertitude, concernant la méthode sous lumière solaire globale (colonne de gauche) et sa version simplifiée (colonne de droite), sont indiquées; elles ont pour résultats des incertitudes combinées élargies U_{95} (avec un facteur de couverture $k = 2$) respectivement de 0,8 % et de 1,1 %.

Tableau A.1 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives à la méthode sous lumière solaire globale

Incertitude de mesure du courant de court-circuit	0,1 %	
Incertitude due à l'instabilité de température de cellule (± 2 K)	0,1 %	
Incertitude de l'éclairement énergétique direct	0,4 %	
Incertitude de l'éclairement énergétique diffus	1,6 %	
Incertitude de l'éclairement énergétique total (80 % direct et 20 % diffus)	0,6 %	
Incertitudes dues à la correction de désadaptation spectrale (CEI 60904-7) ou aux écarts spectraux d'éclairement énergétique entre les conditions d'essai et l'éclairement énergétique spectral de référence AM 1,5 (CEI 60904-3)	0,3 %	0,4 %
Variations des données sur différents jours	0,3 %	0,8 %
Incertitude combinée élargie	0,8 %	1,1 %

A.2.5 Documents de référence

- K.A. Emery, C.R. Osterwald, L.L. Kazmerski, and R.E. Hart, (1988c), Calibration of Primary Terrestrial Reference Cells When Compared With Primary AM0 Reference Cells, Proceedings of the 8th PV Solar Energy Conference, Florence, pp. 64-68.
- K. A. Emery, C.R. Osterwald, S. Rummel, D.R. Myers, T.L. Stoffel, and D. Waddington, "A Comparison of Photovoltaic Calibration Methods," Proc. 9th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Freiburg, W. Germany, September 25-29, 1989, pp. 648-651.

- K.A. Emery, D. Waddington, S. Rummel, D.R. Myers, T.L. Stoffel, and C.R. Osterwald, "SERI Results from the PEP 1987 Summit Round Robin and a Comparison of Photovoltaic Calibration Methods," SERI tech. rep. TR-213-3472, March 1989.
- Gomez, T, Garcia L, Martinez G, "Ground level sunlight calibration of space solar cells. Tenerife 99 campaign," Proc. 28th IEEE PVSC, 1332-1335, (2000).
- J. Metzdorf, T. Wittchen, K. Heidler, K. Dehne, R. Shimokawa, F. Nagamine, H. Ossenbrink, L. Fornarini, C. Goodbody, M. Davies, K. Emery, and R. Deblasio, "The Results of the PEP '87 Round-Robin Calibration of Reference Cells and Modules,- Final Report" PTB technical report PTB-Opt-31, Braunschweig, Germany, November 1990, ISBN 3-89429-067-6.
- H. Müllejans, A. Ioannides, R. Kenny, W. Zaaiman, H. A. Ossenbrink, E. D. Dunlop "Spectral mismatch in calibration of photovoltaic reference devices by global sunlight method" *Measurement Science and Technology* **16** (2005) 1250-1254.
- H. Müllejans, W. Zaaiman, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink "Calibration of photovoltaic reference cells by global sunlight method", *Metrologia* **42** (2005) 360-367.
- H. Müllejans, W. Zaaiman, F. Merli, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink "Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells" *Progress in Photovoltaics* **13** (2005) 661-671.
- F.C. Treble and K.H. Krebs, "Comparison of European Reference Solar Cell Calibrations", Proc. 15th IEEE PV Spec. Conf., 1981, pp. 205-210.
- R. Whitaker, G. Zerlaut, and A. Purnell, "Experimental demonstration of the efficacy of global versus direct beam use in photovoltaic performance prediction of flat plate photovoltaic modules", Proc 16th IEEE PVSC, pp. 469-474, 1982.

A.3 Etalonnage par sensibilité spectrale différentielle (étalonnage DSR)

La traçabilité est basée sur un étalonnage de sensibilité spectrale s'appuyant sur des détecteurs étalons directement traçables en unités SI. La valeur d'étalonnage est calculée à partir de la sensibilité spectrale absolue mesurée de la cellule de référence et à partir de la distribution spectrale de l'éclairement énergétique solaire de référence. L'étalonnage de la sensibilité spectrale est transféré du niveau de l'éclairement énergétique du détecteur étalon au niveau de l'éclairement énergétique solaire en franchissant plusieurs ordres de grandeur, sans aucune restriction vis-à-vis de la cellule solaire pour ce qui concerne les linéarités ou l'adaptation spectrale.

A.3.1 Equipements

L'appareillage suivant est nécessaire (voir les Figures A.1 et A.2)

- a) Un monochromateur produisant un éclairement énergétique spectral haché d'au moins $1 \text{ mWm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ dans la gamme des longueurs d'onde couvrant la sensibilité spectrale de la cellule solaire de référence à étalonner, avec un réglage de longueur d'onde traçable.
- b) Une ou des lampes avec un système optique d'entrée de type lentilles ou miroir (il est recommandé d'utiliser des lampes quartz-halogène pour couvrir des longueurs d'onde supérieures à 400 nm et des lampes à arc au xénon pour les longueurs d'onde inférieures à 400 nm).
- c) Une source lumineuse de polarisation, satisfaisant, du point de vue de l'éclairement énergétique spectral, les exigences d'uniformité et de stabilité temporelle de la classe CBA, telle que définie par la CEI 60904-9.
- d) Un faisceau monochromatique haché, dont l'étalonnage de longueur d'onde est traçable, destiné à l'étalonnage absolu à une ou à plusieurs longueurs d'onde discrètes. La non-uniformité doit être inférieure à $\pm 3 \%$ dans la zone active du dispositif à étalonner.
- e) Une photodiode de surveillance, assez grande pour surveiller la puissance de rayonnement du faisceau monochromatique issu des appareils des points a) et d).

- f) Un ou des détecteurs étalons de rayonnement, avec contrôle de température, directement traçables en unités SI. Ces détecteurs doivent être constitués de photodiodes avec les meilleures linéarités, uniformité et stabilité disponibles.
- g) Un diaphragme réglable (se reportant en "image" sur la cellule de référence).
- h) Des moyens pour maintenir la température de la cellule de référence à $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.
- i) Des moyens de mesure des courants alternatifs de court-circuit de la cellule de référence, du ou des détecteurs étalons et du détecteur de surveillance, par exemple, avec un amplificateur asservi. La variation du facteur d'amplification de ces amplificateurs doit être inférieure à 0,1 % sur toutes les gammes de signal utilisées. De préférence, le même amplificateur est utilisé pour la cellule de référence et le détecteur étalon.
- j) Des moyens de mesure de la composante continue, I_b , de la cellule de référence, comme cela est défini à l'étape A.3.2.f.

A.3.2 Procédure d'essai

- a) Régler et maintenir la température de la cellule de référence à $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.
- b) Ajuster l'ouverture du diaphragme jusqu'à ce que son image coïncide avec la zone active de la cellule de référence à ± 1 mm près.
- c) Monter le détecteur étalon dans une position proche du foyer du faisceau monochromatique, collectant ainsi toute la puissance du rayonnement.
- d) Etalonner la source monochromatique d'éclairement énergétique du point A.3.1.a) (sans rayonnement de polarisation) conformément à son éclairement énergétique spectral relatif.
- e) Utiliser son faisceau monochromatique haché pour déterminer le rapport des courants alternatifs de court-circuit de la photodiode de surveillance ($\Delta I_{\text{mon,cal}}$) et ceux du détecteur étalon (ΔI_{st}), mesurés simultanément à des intervalles de longueur d'onde inférieurs ou égaux à 10 nm sur la totalité du domaine de sensibilité.
- f) Régler l'éclairement énergétique en lumière blanche de polarisation, E_b , au niveau opérationnel désiré (entre 10 Wm^{-2} et $1\,100 \text{ Wm}^{-2}$) et mesurer le courant continu de court-circuit correspondant, $I_b = I_{\text{sc}}(E_b)$.
- g) Mesurer la sensibilité spectrale relative de la cellule de référence en utilisant le rayonnement monochromatique haché de la source d'éclairement énergétique du point A.3.1.a) et en déterminant le rapport des courants de court-circuit de la cellule de référence (ΔI_{ref}) et de la photodiode de surveillance (ΔI_{mon}), et calculer la sensibilité spectrale différentielle relative $s(\lambda, I_b)_{\text{rel}}$ de la cellule de référence, sous éclairement énergétique de polarisation E_b :

$$s(\lambda, I_b)_{\text{rel}} = \frac{\Delta I_{\text{ref}}}{\Delta I_{\text{mon}}} \cdot \frac{\Delta I_{\text{mon,cal}}}{\Delta I_{\text{st}}} \cdot S_{\text{st}}(\lambda) \quad (\text{A.8})$$

où $S_{\text{st}}(\lambda)$ = sensibilité spectrale du détecteur étalon à la longueur d'onde λ .

- h) Répéter les étapes f) et g) à au moins 5 niveaux de polarisation différents, pour couvrir au minimum la plage de 10 Wm^{-2} à $1\,100 \text{ Wm}^{-2}$, incluant ainsi un essai de linéarité de la sensibilité spectrale relative.
- i) Avec le réglage de l'éclairement énergétique de polarisation fixé comme indiqué à l'étape f), proche d'un faible niveau ou au minimum de celui spécifié à l'étape h), mesurer la sensibilité spectrale différentielle absolue de la cellule de référence aux 3 longueurs d'onde du jeu de filtres à bande étroite et le courant continu de court-circuit $I_0 = I_{\text{sc}}(E_0)$. Ceci est réalisé en utilisant le rayonnement monochromatique haché et filtré, comme cela est décrit au point A.3.1.d).
- j) La sensibilité spectrale différentielle absolue, $s(\lambda_i, I_0)$, avec $i = 1, 2, 3$ est déterminée par le rapport du courant de court-circuit et de l'éclairement énergétique (tel que mesuré par le détecteur étalon dans le plan de travail) avec chaque filtre utilisé tour à tour.

A.3.3 Analyse des données

- a) Calculer le rapport $k_1(\lambda_i) = (\text{sensibilité spectrale relative déterminée en A.3.2.g})/(\text{sensibilité spectrale absolue déterminée en A.3.2.i.})$, pour chacune des trois longueurs d'onde, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, sous éclairement énergétique E_0 .
- b) Calculer les sensibilités spectrales différentielles absolues en mettant à l'échelle la sensibilité relative avec la valeur moyenne des k_i déterminés à l'étape a):

$$s(\lambda, I_b) = s(\lambda, I_b)_{\text{rel}} * (k_1 + k_2 + k_3)/3 \quad (\text{A.9})$$

- c) Calculer la sensibilité différentielle $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ sous éclairement énergétique avec $E_s(\lambda)$, pour au moins 5 niveaux différents de lumière de polarisation, déterminée par I_b :

$$s_{\text{AM1.5}}(I_b) = \frac{\int s(\lambda, I_b) \cdot E_s(\lambda) \cdot d\lambda}{E_{\text{STC}}} \quad (\text{A.10})$$

avec

$$E_{\text{STC}} = \int E_s(\lambda) d\lambda = 1000 \text{ Wm}^{-2} \quad (\text{A.11})$$

et

$$I_b = I_{\text{sc}}(E_b) \quad (\text{A.12})$$

- d) La cellule solaire de référence peut être considérée comme linéaire, si la variation de $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ sur plus de 5 jeux de mesures successifs, à différents niveaux de lumière de polarisation, est inférieure à $\pm 0,5 \%$. Dans ce cas, prendre la moyenne de $s_{\text{AM1.5}}(I_b)$ comme sensibilité définitive dans les conditions normales d'essai (STC) et calculer CV:

$$CV = s_{\text{AM1.5}} E_{\text{STC}} \quad (\text{A.13})$$

- e) Si la cellule de référence est non linéaire, elle ne doit pas servir d'étalon de transfert au sens du domaine d'application de la présente norme.

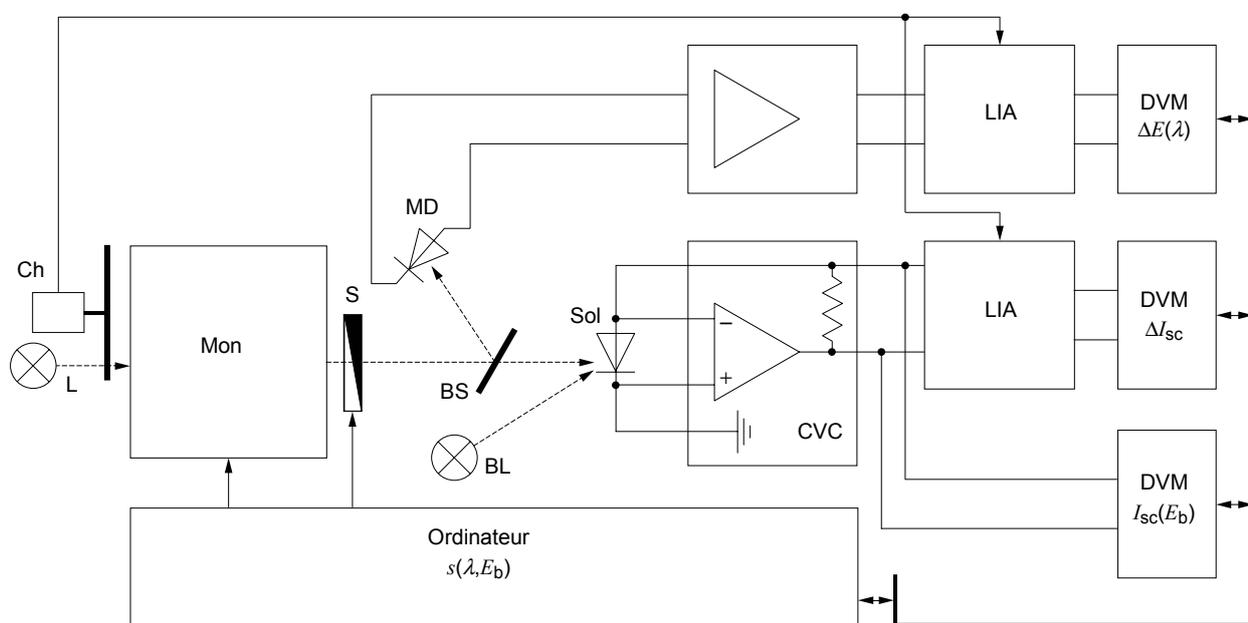
A.3.4 Evaluation de l'incertitude

Dans le Tableau A.2 suivant, les valeurs types des composantes de l'incertitude sont résumées; elles ont pour résultat une incertitude combinée élargie de $U_{95} < 1 \%$ (avec facteur de couverture $k = 2$).

NOTE La composante principale de l'incertitude est celle du détecteur étalon. L'incertitude citée n'est pas facilement obtenue et peut n'être effective que dans quelques instituts nationaux de métrologie (INM).

Tableau A.2 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) d'un étalonnage par sensibilité spectrale différentielle

Incertitude du ou des détecteurs étalons	< 0,5 %
Incertitude due aux cellules non linéaires ou à bande étroite	< 0,1 %
Incertitude due à l'instabilité de température de cellule (± 2 K)	< 0,2 %
Incertitudes de transfert dues à: La sensibilité spectrale relative	Non applicable
La sensibilité spectrale absolue à une ou des longueurs d'onde discrètes	< 0,1 %
La désadaptation spectrale entre le rayonnement de polarisation et le spectre solaire de référence; l'irrégularité du rayonnement de polarisation; l'irrégularité du rayonnement monochromatique; la désadaptation de la zone des cellules et de la zone irradiée (image du diaphragme); la largeur de bande spectrale (≤ 20 nm) du rayonnement monochromatique; la non-linéarité des amplificateurs	< 0,2 %
Incertitude combinée élargie	< 1 %

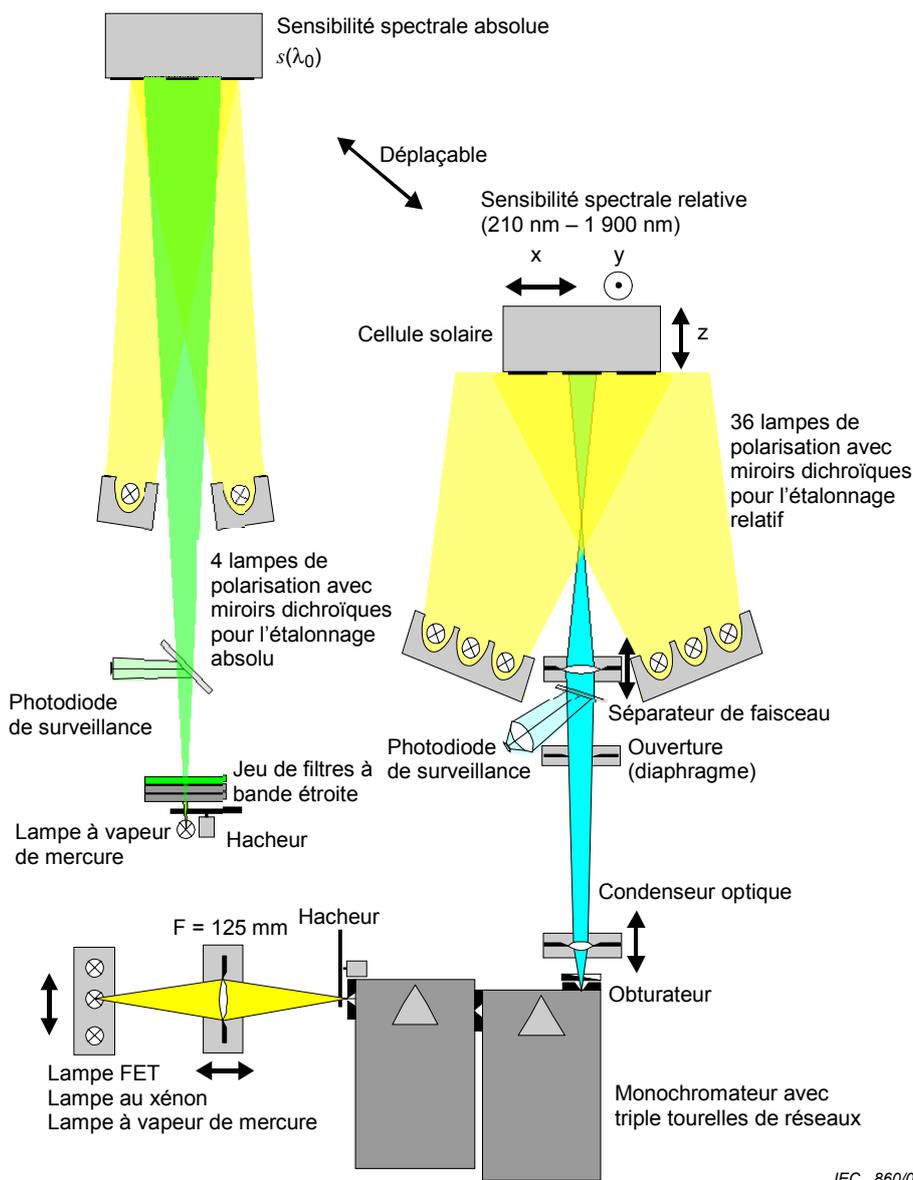


IEC 859/09

Légende

Mon: monochromateur Ch: hacheur, L: source lumineuse avec système optique d'entrée, S: obturateur, BS: séparateur de faisceau, MD: photodiode de surveillance, BL: lampe ou réseau de lampes de polarisation, Sol: cellule solaire et détecteur étalon, respectivement, CVC: convertisseur courant tension, LIA: amplificateur asservi

Figure A.1 – Schéma synoptique de l'étalonnage par sensibilité spectrale différentielle avec superposition d'un rayonnement monochromatique haché $DE(I)$ et d'un rayonnement de polarisation E_b



IEC 860/09

Figure A.2 – Montage optique pour étalonnage par sensibilité spectrale différentielle

A.3.5 Documents de référence

- J. Metzdorf "Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method", *Appl. Optics* **26** (9) (1987) 1701-1708.
- J. Metzdorf, S. Winter, T. Wittchen "Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values" *metrologia* **37** (2000) 573-578.
- S. Winter, T. Wittchen, J. Metzdorf "Primary Reference Cell Calibration at the PTB Based on an Improved DSR Facility" in "Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conf.", ed. by H. Scherr, B. Mc/Velis, E. Palz, H. A. Ossenbrink, E. Dunlop, P. Helm (Glasgow 2000) James & James (Science Publ., London), ISBN 1 902916 19 0.

A.4 Méthode du simulateur solaire

La traçabilité est basée sur l'éclairement énergétique spectral absolu de la lumière solaire simulée et sur la sensibilité spectrale relative de la cellule solaire de référence à étalonner. L'éclairement énergétique spectral absolu doit être mesuré à l'aide d'un spectroradiomètre

étalonné par des lampes étalons directement traçables en unités de SI, et la sensibilité spectrale doit être étalonnée par des détecteurs étalons directement traçables en unités de SI. Lorsque la traçabilité par rapport à la WRR est demandée, l'éclairement énergétique absolu du simulateur solaire doit être mesuré en utilisant un radiomètre à cavité, traçable par rapport à la WRR. La valeur d'étalonnage est calculée à partir de la sensibilité spectrale mesurée de la cellule de référence, de la répartition spectrale de l'éclairement énergétique du simulateur solaire et de la répartition spectrale de l'éclairement énergétique solaire de référence (CEI 60904-3).

A.4.1 Equipements

L'appareillage suivant est nécessaire (voir la Figure A.3).

- Un simulateur solaire de la classe AAA, telle que définie par la CEI 60904-9.
- Un spectroradiomètre, tel que décrit dans le document CIE 53-1982.
- Des moyens pour mesurer la sensibilité spectrale de la cellule de référence, comme cela est défini par la CEI 60904-8.
- Une lampe étalon ayant été directement étalonnée par des lampes étalons primaires, qui doivent être mutuellement reconnues et autorisées par le CCPR/CIE.
- Un radiomètre à cavité traçable par rapport à la WRR, dont l'angle de vision est plus ouvert que l'angle de dispersion du simulateur de lumière solaire (en option).
- Des moyens pour mesurer le courant de court-circuit de la cellule de référence, devant être conforme aux exigences générales de mesure de la CEI 60904-1.
- Des moyens pour maintenir la température de la cellule de référence à $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

A.4.2 Procédure d'étalonnage

- La réponse spectrale relative de la cellule de référence doit être mesurée avec une lumière blanche de polarisation de $1\,000\text{ Wm}^{-2}$ à $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$, conformément à la CEI 60904-8.
- L'éclairement énergétique du simulateur solaire dans le plan d'essai doit être réglé à approximativement $1\,000\text{ Wm}^{-2}$, en utilisant un photodétecteur thermique, tel qu'une thermopile.
- La répartition spectrale de l'éclairement énergétique absolu dans le plan d'essai doit être mesurée par le spectroradiomètre, étalonné comme cela est décrit dans le document CIE 63-1984.

NOTE Pour le calcul décrit en A.4.3 a), la gamme des longueurs d'onde doit s'étendre au moins sur le même intervalle que $S(\lambda)$. Lorsque la cavité est utilisée, comme en A.4.3 b), la gamme des longueurs d'onde de la mesure de l'éclairement énergétique spectral doit être suffisamment étendue pour obtenir l'incertitude désirée.

- La cellule de référence doit être située dans le plan d'essai du simulateur. La température de la cellule doit être maintenue à $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Le courant de court-circuit de la cellule est à mesurer plus de 10 fois et la valeur moyenne doit être calculée.

A.4.3 Analyse des données

- La valeur d'étalonnage (CV) doit être calculée de la manière suivante:

$$CV = I_{\text{SC}} \frac{\int E_{\text{S}}(\lambda)S(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{m}}(\lambda)S(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A.14})$$

où:

$E_{\text{m}}(\lambda)$ est la répartition spectrale de l'éclairement énergétique absolue du simulateur solaire.

- Lorsque la traçabilité directe par rapport la WRR est demandée, l'éclairement énergétique absolu du simulateur solaire doit être mesuré en utilisant un radiomètre à cavité traçable par rapport à la WRR, comme cela est décrit en A.4.1.e). La valeur d'étalonnage (CV) est

calculée conformément à l'Equation A.4 où G_T est l'éclairement énergétique total du simulateur solaire, mesuré par un radiomètre à cavité traçable par rapport à la WRR.

- c) En répétant les étapes A.4.2 et A.4.3 deux fois, le CV moyen est à calculer comme étant la valeur finale d'étalonnage.

A.4.4 Evaluation de l'incertitude

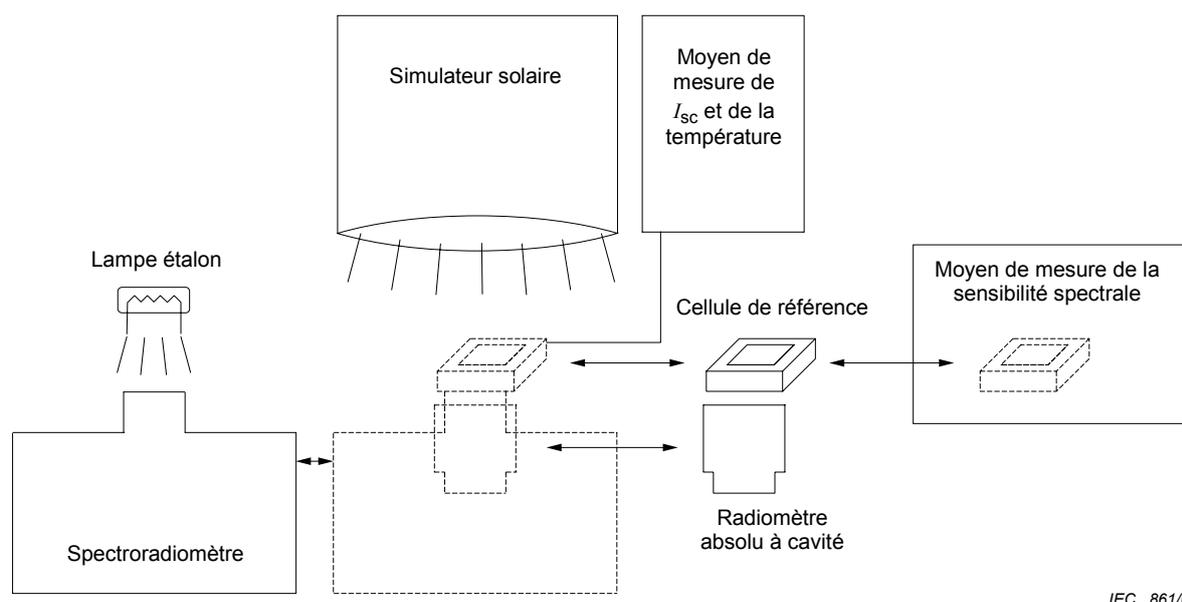
Dans les Tableaux A.3 et A.4 suivants, les valeurs types des composantes de l'incertitude sont résumées; elles ont pour résultat une incertitude combinée élargie de U_{95} , de 2 % et 0,6 % (avec facteur de couverture $k = 2$).

Tableau A.3 – Exemple de composantes de l'incertitude ($k = 2$) relatives à un étalonnage par la méthode du simulateur solaire

Incertitude de la lampe étalon	< 2 %
Incertitude due au spectroradiomètre	< 0,2 %
Incertitude due à l'instabilité de température de la cellule	< 0,2 %
Incertitudes de transfert dues à la sensibilité spectrale, à la désadaptation spectrale entre le simulateur solaire et le spectre solaire de référence	< 0,2 %
Incertitude due à la non-uniformité temporelle et spatiale du simulateur solaire, et aux dimensions et constantes de temps différentes du spectroradiomètre et de la cellule	< 0,2 %
Incertitude combinée élargie	2 %

Tableau A.4 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives à un étalonnage par la méthode du simulateur solaire, en utilisant un radiomètre à cavité traçable par rapport à la WRR

Incertitude de la WRR en unités SI	< 0,4 %
Incertitude de mesure de l'éclairement énergétique	< 0,2 %
Incertitude due à l'instabilité de température de la cellule	< 0,2 %
Incertitudes dues aux variations de l'éclairement énergétique spectral entre les conditions d'essai et l'éclairement énergétique spectral de référence AM 1,5 (CEI 60904-3) ou à la correction de désadaptation spectrale (CEI 60904-7)	< 0,3 %
Incertitude due à la non-uniformité temporelle et spatiale du simulateur solaire, et aux dimensions et constantes de temps différentes du spectroradiomètre, de la cellule et du radiomètre à cavité	< 0,2 %
Incertitude combinée élargie	0,6 %



IEC 861/09

Figure A.3 – Appareillage schématique relatif à la méthode du simulateur solaire

A.4.5 Documents de référence

- R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa, Y. Hamakawa "Japanese indoor calibration method for the reference solar cell and comparison with outdoor calibration" *Japanese J. Appl. Phys.* **26**(1) (1987) 86-91.
- R. Shimokawa, H. Ikeda, Y. Miyake, S. Igari "Development of wide field-of-view cavity radiometer for solar simulator use and intercomparison between irradiance measurements based on the world radiometer reference and electrotechnical laboratory scales" *Japanese J. Appl. Phys.* **41** (2002) 5088-5093.
- H. Müllejans, W. Zaaiman, F. Merli, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink "Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells" *Progress in Photovoltaics* **13** (2005) 661-671.
- CIE 53-1982 "Methods of Characterizing the Performance of radiometers and Photometers", ISBN 92 9034 053 3.
- CIE 63-1984 "The Spectroradiometric Measurement of Light Sources".

A.5 Méthode de la lumière solaire directe

La cellule solaire de référence à étalonner est comparée, sous un faisceau direct de lumière solaire naturelle, à un radiomètre de référence. L'établissement de la traçabilité est basé sur l'étalonnage utilisant un pyréliomètre mesurant l'éclairement énergétique solaire direct et traçable par rapport à la WRR. Le courant de court-circuit de la cellule solaire est mesuré, normé à $1\,000\text{ W/m}^2$ et corrigé en fonction de la température et de la désadaptation spectrale entre le spectre de la lumière solaire naturelle issue du faisceau direct, mesuré par un spectroradiomètre, et le spectre normalisé défini (CEI 60904-3). La réponse spectrale relative de la cellule solaire doit être également déterminée.

A.5.1 Equipement

- a) Une plateforme support, pouvant être orientée perpendiculairement au soleil avec une exactitude de $\pm 0,5^\circ$ dans toute la séquence d'étalonnage.
- b) Un radiomètre à cavité, traçable par rapport à la WRR.
- c) Un tube collimateur pour la cellule solaire ayant le même angle de vision que le radiomètre à cavité.

- d) Un bloc support à température contrôlée pour la cellule de référence à étalonner, capable de maintenir la température de jonction à (25 ± 2) °C pendant toutes les séquences d'étalonnage. Des moyens de mesure de la température de la cellule solaire de référence à étalonner.
- e) Des moyens de mesure traçables pour mesurer le courant de court-circuit de la cellule solaire, avec une exactitude de $\pm 0,1$ % ou mieux.
- f) Un spectroradiomètre pour mesurer l'éclairement énergétique spectral solaire normal direct, avec le même angle de vision que le radiomètre à cavité.
- g) Un appareil pour mesurer la réponse spectrale relative de la cellule solaire.

A.5.2 Mesurage

- a) Monter la cellule de référence à étalonner avec le collimateur, le radiomètre à cavité, et le spectroradiomètre, coplanaires sur la plateforme de poursuite.
- b) Mesurer l'éclairement énergétique spectral relatif du soleil, $E_m(\lambda)$, à l'aide du spectroradiomètre. Pendant la mesure de l'éclairement énergétique spectral, réaliser simultanément les étapes suivantes:
 - 1) Mesurer la sortie du radiomètre à cavité, G_{dir} , et vérifier que l'éclairement énergétique total est compris entre 750 Wm^{-2} et $1\,100 \text{ Wm}^{-2}$.
 - 2) Mesurer le courant de court-circuit, I_{SC} , de la cellule solaire de référence à étalonner.
 - 3) Mesurer la température de la cellule de référence, T_j .
 - 4) Répéter ces étapes au moins quatre fois. Ces répétitions doivent être réparties dans le temps pendant la mesure de l'éclairement énergétique spectral.
- c) Exécuter, au minimum, cinq répliques de l'étape b) sur au moins trois jours distincts.

A.5.3 Analyse des données

- a) Effectuer la correction de l'Equation A.1, où G_T est le relevé du radiomètre à cavité, représentant l'éclairement énergétique direct G_{dir} .
- b) Faire la moyenne des valeurs d'étalonnage de a) pour chaque mesure de l'éclairement énergétique spectral.
- c) Élargir l'éclairement énergétique spectral mesuré au domaine 300-4 000 nm, conformément aux références, pour encadrer les limites du spectre normé (CEI 60904-3).
- d) Corriger chaque résultat de l'étape b) en fonction de la température, en utilisant l'Equation A.2, et ensuite en fonction des effets spectraux, conformément à l'Equation A.3, où $E_m(\lambda)$ est l'éclairement énergétique spectral solaire du faisceau direct; CV est alors obtenu conformément à l'Equation A.4.
- e) Faire la moyenne des valeurs d'étalonnage sur chaque jour et calculer la moyenne arithmétique de ces valeurs CV en utilisant l'Equation A.5.
- f) Éliminer tout point satisfaisant aux critères suivants:
 - 1) CV_i supérieure à 1,5 % de CV;
 - 2) plage des I_{SC} supérieure à 1,5 %;
 - 3) écart type des $CV_i(T_j) > 1$ %.
- g) Vérifier que les données, sur au moins 3 jours, avec au minimum 5 jeux de données valides par jour, existent. Si ce n'est pas le cas, effectuer des mesures supplémentaires jusqu'à ce que ce critère soit satisfait.

A.5.4 Evaluation de l'incertitude

Dans le Tableau A.5 suivant, les valeurs types des composantes de l'incertitude, concernant la méthode de la lumière solaire directe, sont indiquées; elles ont pour résultat une incertitude combinée élargie U_{95} (avec un facteur de couverture $k = 2$) de 0,9 %.

**Tableau A.5 – Composantes types de l'incertitude ($k = 2$) relatives
à la méthode de la lumière solaire directe**

Incertitude de la WRR en unités SI	0,4 %
Éclairement énergétique direct mesuré	0,2 %
Correction de désadaptation spectrale	0,8 %
Incertitude due à la correction de température de la cellule	0,2 %
Incertitude combinée élargie	0,9 %

A.5.5 Documents de référence

- C.R. Osterwald, K.A. Emery, D.R. Myers, R.E. Hart “Primary reference cell calibrations at SERI: History and methods” Proc. 21st IEEE PVSC Orlando, FL, May 21-25 1990, 1062-1067.
- K.A. Emery, C.R. Osterwald, L.L. Kazmerski, R.E. Hart “Calibration of primary terrestrial reference cells when compared with primary AM0 reference cells » Proc. 8th European PVSEC, Florence, Italy, may 9-12 1988 p. 64-68.
- C. Osterwald, K. Emery «Spectroradiometric Sun Photometry» Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, **17** (200) 1171-1188.
- ASTM E 1125 “Standard test method for calibration of primary non-concentrator terrestrial photovoltaic reference cells using a tabular spectrum”.

Bibliographie

CEI 60891, *Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V mesurées des dispositifs photovoltaïques au silicium cristallin*

CEI 60904-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1: Mesure des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques*

CEI 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*

CEI 60904-7, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 7: Calcul de la correction de désadaptation des réponses spectrales dans les mesures de dispositifs photovoltaïques*

CEI 60904-8, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8: Mesures de la réponse spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)*

CEI 60904-9, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 9: Exigences pour le fonctionnement des simulateurs solaires*

CEI 61836, *Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire – Termes, définitions et symboles* (disponible en anglais seulement)

Guide ISO/CEI 99:2007, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

NIST Technical Note 1297:1994, *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurements Results* (disponible en anglais seulement)

The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, United Kingdom, Accreditation Service, M3003, Middlesex, UK, December 1997 (disponible en anglais seulement)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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