

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments –
Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters**

**Étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/appareil de mesure
de la fréquence optique –
Partie 2: Appareils de mesure de longueur d'onde unique à interféromètre de
Michelson**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments –
Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters**

**Étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/appareil de mesure
de la fréquence optique –
Partie 2: Appareils de mesure de longueur d'onde unique à interféromètre de
Michelson**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 33.180.30

ISBN 978-2-88912-523-4

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms and definitions	7
4 Preparation for calibration	11
4.1 Organization	11
4.2 Traceability.....	11
4.3 Advice for measurements and calibrations	11
4.4 Recommendations to customers	12
5 Single wavelength calibration	12
5.1 General	12
5.2 Establishing calibration conditions.....	12
5.3 Calibration procedure	13
5.3.1 General	13
5.3.2 Measurement configuration	13
5.3.3 Detailed procedure.....	15
5.3.4 Stability test (if necessary)	15
5.3.5 "On/Off repeatability" measurement (optional if a specification is available).....	16
5.3.6 Wavelength dependence measurement (optional)	18
5.3.7 Connector repeatability measurement (optional).....	19
5.4 Calibration uncertainty	20
5.5 Reporting the results	21
6 Absolute power calibration	21
Annex A (normative) Mathematical basis	22
Annex B (informative) Rejection of outliers	25
Annex C (informative) Example of a single wavelength calibration	27
Annex D (informative) ITU wavelength bands	30
Annex E (informative) Atomic and molecular reference transitions	31
Annex F (informative) Reference locked laser example.....	42
Annex G (informative) Balance between accuracy and calibration time.....	44
Bibliography.....	46
Figure 1 – Example of a traceability chain.....	10
Figure 2 – Wavelength meter measurement using a lock quality monitor signal.....	14
Figure 3 – Wavelength meter measurement using a reference wavelength meter.....	14
Figure F.1 – Typical measurement arrangement to lock laser to gas absorption line.....	43
Table 1 – Typical parameters to calculate the "On/Off repeatability" measurement duration	17
Table B.1 – Critical values Z_c as a function of sample size N	26
Table C.1 – Type A uncertainty contributions for a stability measurement	27
Table C.2 – Uncertainty contributions for a "On/Off repeatability" measurement	28

Table C.3 – Uncertainty budget for wavelength dependence	28
Table C.4 – Uncertainty budget for the wavelength meter calibration.....	29
Table D.1 – The ITU-T bands in different units	30
Table E.1 – Helium-neon laser lines	32
Table E.2 – Centre vacuum wavelengths for Acetylene $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$	33
Table E.3 – Frequency and vacuum wavelength values for the $\nu_1 + \nu_3$ and $\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$ bands of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$	35
Table E.4 – List of H^{13}CN transitions.....	38
Table E.5 – List of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ transitions.....	40
Table E.6 – Excited state optogalvanic transitions	41
Table G.1 – Summary of choices	45

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CALIBRATION OF WAVELENGTH/OPTICAL FREQUENCY
MEASUREMENT INSTRUMENTS –****Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters**

FOREWORD

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

International Standard IEC 62129-2 has been prepared by IEC technical committee 86: Fibre optics.

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

FDIS	Report on voting
86/395/FDIS	86/399/RVD

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

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

The list of all parts in the IEC 62129 series, published under the general title, *Calibration of wavelength/optical frequency – Measurement instruments*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC 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.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

INTRODUCTION

Wavelength meters, often based on the Michelson interferometer, are designed to measure the wavelength of an optical source as accurately as possible. Although the wavelength meters contain an internal absolute reference, typically a Helium-Neon laser, calibration is required to achieve the highest accuracies. The instrument is typically used to measure wavelengths other than that of the internal reference. Corrections are made within the instrument for the refractive index of the surrounding air. A precise description of the calibration conditions must therefore be an integral part of the calibration.

This international standard defines all of the steps involved in the calibration process: establishing the calibration conditions, carrying out the calibration, calculating the uncertainty, and reporting the uncertainty, the calibration conditions and the traceability.

The calibration procedure describes how to determine the ratio between the value of the input reference wavelength (or the optical frequency) and the wavelength meter's result. This ratio is called *correction factor*. The measurement uncertainty of the correction factor is combined following Annex A from uncertainty contributions from the reference meter, the test meter, the setup and the procedure.

The calculations go through detailed characterization of individual uncertainties. It is important to know that:

- a) estimations of the individual uncertainties are acceptable;
- b) a detailed uncertainty analysis is only necessary once for each wavelength meter type under test, and that all subsequent calibrations can be based on this one-time analysis;
- c) some of the individual uncertainties can simply be considered to be part of a checklist, with an actual value which can be neglected.

A number of optical frequency references can be used to provide a traceable optical frequency. These are based on absorption by gas molecules under low pressure and using excited-state opto-galvanic transitions in atoms. Annex E lists the lines.

CALIBRATION OF WAVELENGTH/OPTICAL FREQUENCY MEASUREMENT INSTRUMENTS –

Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters

1 Scope

This part of IEC 62129 is applicable to instruments measuring the vacuum wavelength or optical frequency emitted from sources that are typical for the fibre-optic communications industry. These sources include Distributed Feedback (DFB) laser diodes, External Cavity lasers and single longitudinal mode fibre-type sources. It is assumed that the optical radiation will be coupled to the wavelength meter by a single-mode optical fibre. The standard describes the calibration of wavelength meters to be performed by calibration laboratories or by wavelength meter manufacturers. This standard is part of the IEC 62129 series on the calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments. Refer to IEC 62129 for the calibration of optical spectrum analyzers.

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 60050-300:2001, *International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements – Part 312: General terms relating to electrical instruments – Part 313: Types of electrical measuring instruments – Part 314: Specific terms according to the type of instrument*

IEC 61315 :2005, *Calibration of fibre-optic power meters*

IEC/TR 61931:1998, *Fibre optic – Terminology*

ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

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

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.

3.1

accredited calibration laboratory

calibration laboratory authorized by the appropriate national organization to issue calibration certificates with a minimum specified uncertainty, which demonstrate traceability to *national standards*

3.2 adjustment

set of operations carried out on an instrument in order that it provides given indications corresponding to given values of the measurand

[IEC 60050-300:2001 (311-03-16); see also ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11, modified]

3.3 calibration

set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between the values of quantities indicated by a measuring instrument and the corresponding values realized by standards

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39, modified]

NOTE 1 The result of a calibration permits either the assignment of values of measurands to the indications or the determination of corrections with respect to indications.

NOTE 2 A calibration may also determine other metrological properties such as the effect of influence quantities.

NOTE 3 The result of a calibration may be recorded in a document, sometimes called a calibration certificate or a calibration report.

3.4 calibration conditions

conditions of measurements in which the calibration is performed

3.5 correction factor

CF

numerical factor by which the uncorrected result of a measurement is multiplied to compensate for systematic error

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.53, modified]

3.6 detector

the element of the wavelength meter that transduces the radiant optical power into a measurable, usually electrical quantity

[IEC/TR 61931 and ISO/IEC Guide 99:2007, 3.9, modified]

3.7 deviation

value minus its reference value

NOTE In this standard, the deviation is the difference between the indication of the test meter and the indication of the reference meter when excited under the same conditions.

3.8 excitation (fibre-)

description of the distribution of optical power between the modes in the fibre

NOTE Single mode fibres are generally assumed to be excited by only one mode (the fundamental mode).

3.9 instrument state

complete description of the state of the meter during the calibration

3.10**measuring range**

set of values of measurands for which the error of a measuring instrument is intended to lie within specified limits

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.7, modified]

NOTE In this standard, the measuring range is the range of radiant power (part of the *operating range*), for which the uncertainty at operating conditions is specified. The term "dynamic range" should be avoided in this context.

3.11**national (measurement) standard**

standard recognized by a national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.3, modified]

3.12**national standards laboratory**

laboratory which maintains the *national standard*

3.13**natural standard**

atomic or molecular transition that can be used to realise a reference standard

3.14**operating conditions**

appropriate set of specified ranges of values of influence quantities usually wider than the reference conditions for which the uncertainties of a measuring instrument are specified

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.9, modified]

NOTE The operating conditions and uncertainty at operating conditions are usually specified by manufacturer for the convenience of the user.

3.15**operating range**

specified range of values of one of a set of *operating conditions*

3.16**optical input port**

physical input of the wavelength meter (or standard) to which the radiant power is to be applied or to which the optical fibre end is to be connected. An optical path (path of rays with or without optical elements like lenses, diaphragms, light guides, etc.) is assumed to connect the optical input port with the detector

3.17**reference conditions**

conditions of use prescribed for testing the performance of a measuring instrument or for intercomparison of results of measurements

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.11, modified]

NOTE The reference conditions generally include reference values or reference ranges for the influence quantities affecting the measuring instrument.

3.18**reference wavelength meter**

standard which is used as the reference to calibrate a test wavelength meter

3.19

reference source

laser stabilized by reference to an atomic or molecular transition, or a stabilized frequency comb, of known frequency/wavelength

3.20

reference standard

standard, generally having the highest metrological quality available at a given location or in a given organization, from which measurements made there are derived

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.6, modified]

3.21

test meter

wavelength meter (or standard) to be calibrated by comparison with the *reference wavelength meter or the reference standard*

3.22

traceability

property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons all having stated uncertainties

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41, modified]

3.23

traceability chain

unbroken chain of comparison (see Figure 1)

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41 and 2.42, modified]

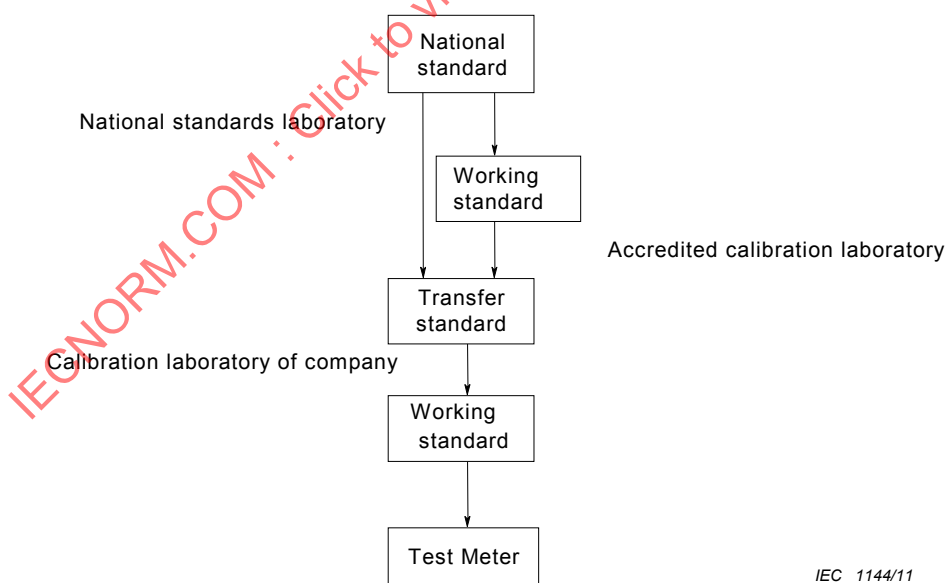


Figure 1 – Example of a traceability chain

3.24

wavelength meter (Michelson interferometer single-)

instrument, based on a Michelson interferometer, capable of measuring the wavelength of one source

NOTE Certain instrument designs can also measure the input power but with a larger uncertainty than most power meters.

3.25

working standard

standard that is used routinely to calibrate measuring instruments

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.7, modified]

NOTE A working standard is usually calibrated against a reference standard.

4 Preparation for calibration

4.1 Organization

The calibration laboratory should satisfy requirements of ISO/IEC 17025.

There shall be a documented measurement procedure for each type of calibration performed, giving step-by-step operating instructions and equipment to be used.

4.2 Traceability

The requirements of ISO/IEC 17025 should be met.

All standards used in the calibration process shall be calibrated according to a documented programme with *traceability* to *national standards laboratories* or to *accredited calibration laboratories*. It is advisable to maintain more than one standard on each hierarchical level, so that the performance of the standard can be verified by comparisons on the same level. Make sure that any other test equipment which has a significant influence on the calibration results is calibrated. Upon request, specify this test equipment and its *traceability chain(s)*. The re-calibration period(s) shall be defined and documented.

4.3 Advice for measurements and calibrations

This subclause gives general advice for all measurements and calibrations of wavelength meters.

The calibration should be made in a temperature-controlled environment. The recommended temperature is 23 °C. Depending on the desired uncertainty, the temperature, atmospheric pressure and humidity may need to be monitored during the measurement, as the air refractive index is a function of these parameters. Humidity control may be necessary to ensure that the environment is within the operating specification of the instrument.

The laboratory should be kept clean. Connectors and optical input ports should always be cleaned before measurement. The quality and cleanness of the connector in front of the wavelength meter should be checked. The wavelength meter is a precision mechanical instrument and so the fibre should be moved to the instrument rather than the other way round as required for power meter calibrations.

Laser diodes are sensitive to back reflections. To improve stability, it is advisable to use an optical isolator between the laser diode and the test meter.

For instruments that also report optical power, refer to IEC 61315 for calibration procedures. It is important to note that optical sources such as extended cavity laser diodes that may have a narrow linewidth (e.g. 50 kHz) and therefore give rise to a long coherence length. Coherent reflections will add as the vector sum of the electric fields rather than the sum of the optical powers.

The use of a reference source based on a natural standard will yield lower uncertainties than calibrations made using a reference wavelength meter.

4.4 Recommendations to customers

A single wavelength meter calibration within an ITU band (see Annex D) is expected to be sufficient for that band. The increase in uncertainties due to extrapolation of the calibration to adjacent bands must be determined for each design of instrument.

5 Single wavelength calibration

5.1 General

The wavelength calibration of the wavelength meter is based on a comparison with a reference standard and the uncertainty comprises the contribution of the stability of the instrument under test, its "On/Off repeatability," its wavelength dependence and the optical connector repeatability.

The correction is based on the calibration result.

The "On/Off repeatability" measurement provides a contribution to the instrument uncertainty calculation. The repeatability of the stabilization of the internal wavelength reference and the stability of the optical alignment are the main contributors to this uncertainty contribution.

The measurement of the wavelength dependence also provides a contribution to the instrument uncertainty calculation. This measurement has several purposes.

- a) To verify that the correction for the air refractive index has been correctly implemented within the instrument.
- b) To determine the uncertainty contributions caused by numerical truncation errors.
- c) To determine the uncertainty contributions caused by the finite optical path length within the test instrument.
- d) To determine systematic alignment effects such as wavelength dependent beam steering.

The calibration can be performed either using a reference source with a lock quality monitor or using a reference wavelength meter.

Acquiring the measurement results under computer control is highly recommended.

5.2 Establishing calibration conditions

Establishing and maintaining the calibration conditions is an important part of the calibration, because any change in these conditions is capable of producing erroneous measurement results. The calibration conditions should be a close approximation to the intended operating conditions. This ensures that the (additional) uncertainty in the operating environment is as small as possible. The calibration conditions should be specified in the form of nominal values with uncertainties when applicable. In order to meet the requirements of this standard, the calibration conditions shall at least consist of

- a) the date of calibration,
- b) the ambient temperature, with uncertainty, for example $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. The temperature may need to be monitored continuously to ensure that it remains within the prescribed limits,
- c) the atmospheric pressure, for example 1020 hPa to 1025 hPa. The atmospheric pressure may need to be monitored continuously to ensure that it remains within the prescribed limits,

- d) the ambient relative humidity, for example 30 % to 50 %. The ambient relative humidity may need to be monitored continuously to ensure that it remains within the prescribed limits. A relative humidity below the condensation point is assumed by default,
- e) the input optical power (that must fall within the allowable specification for the instruments),
- f) the connector and polishing type,
- g) details of the reference material or its identification number. Examples have been taken for a gas absorption cell:
 - 1) gas and isotope, e.g. $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$
 - 2) path length, e.g. 15 cm
 - 3) pressure within the vessel, e.g. 1 000 Pa
 - 4) transition, e.g. R(21)
- h) the centre vacuum wavelength or frequency of the exciting source with its uncertainty,
- i) if a transition locked source is used then the quality of the lock must be continuously monitored during the measurements; a lock indicator can be sufficient.

NOTE The above conditions may not be exhaustive. There may be other parameters that have a significant influence on the measurement uncertainty and therefore should also be reported.

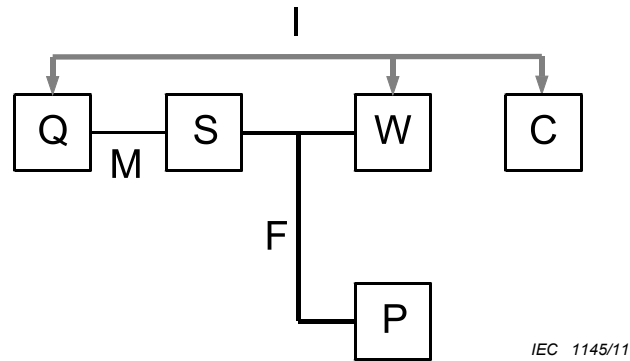
5.3 Calibration procedure

5.3.1 General

- a) Establish and record the appropriate calibration conditions (see 5.2). Switch on all instrumentation and wait for enough time to stabilize.
- b) Set up the reference source.
- c) In some of the older instrument designs a connector-adapter combination is used to couple light from the optical fibre into the instrument. A fraction of the light from the reference signal, typically a helium-neon laser, is emitted from the instrument. This beam defines the optical axis for the interferometer. Maximizing the residual reference signal from the test wavelength meter optimises the alignment of the connector-adapter. The optical power must be measured using a linear power meter.
- d) Set up the instrument state of the test wavelength meter according to the instruction manual. Select appropriate units.
- e) Record the instrument states of the wavelength meter.

5.3.2 Measurement configuration

Figure 2 shows the configuration using a reference source S with a lock-quality monitor Q. The temperature, pressure and humidity of the environment may need to be monitored. The refractive index change due to humidity is less than $\pm 4 \times 10^{-7}$ at 1 550 nm. Monitoring of the relative humidity is optional and is required only to achieve the best specification.



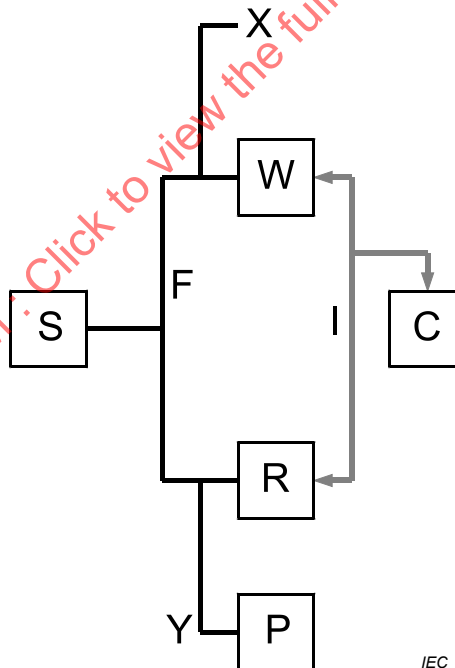
IEC 1145/11

Key

C	controlling computer	P	reference power meter
F	optical fibre link	Q	lock quality monitor
I	computer interface connection	S	reference source
M	monitor link	W	test wavelength meter

Figure 2 – Wavelength meter measurement using a lock quality monitor signal

In the absence of a lock quality signal from the source, a reference wavelength meter must be used to monitor the lock quality (Figure 3). If the lock has been lost, the results drift considerably compared to the locked condition. It is important that the measurements are performed simultaneously on both the reference and the test wavelength meters.



IEC 1146/11

Key

C	controlling computer	R	reference wavelength meter
F	optical fibre link	S	reference source
I	computer interface connection	W	test wavelength meter
P	reference power meter		

NOTE The reference power meter may be used at locations X or Y to measure the optical power incident either on the test or on the reference wavelength meters.

Figure 3 – Wavelength meter measurement using a reference wavelength meter

5.3.3 Detailed procedure

The number of measurements averaged per reading affects the size of the results file, the rejection of data by the measurement routine and detection of lock failure. A large number of samples per measurement will increase the size of the data set used to check that the extreme data points are valid. If the number of samples is too large then the temporal resolution will be reduced. Also, loss of lock may not be detected. Typically, 50 samples (n) are taken per measurement. The same methodology used in 5.3.5 can be applied to determine the optimum value for n . The statistical rejection of outlying points (Annex B) is strongly recommended.

The measurement process is as follows.

- a) Allow the equipment to reach equilibrium.
- b) Configure the data acquisition software.
- c) Ensure that the optical source is locked and is operating correctly.
- d) Run the data acquisition software.

The correction factor is determined from the ratio of the mean values from each measurement:

$$CF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{ref_i}}{\lambda_{test_i}} = \frac{\overline{\lambda_{ref}}}{\overline{\lambda_{test}}} \quad (1)$$

where λ_{ref} is the reference wavelength and λ_{test} is the wavelength measured by the test wavelength meter. The uncertainty associated with the correction factor should be expressed as a dimensionless quantity. We can also determine the deviation D as in Equation (2). The uncertainty associated with the deviation should be expressed as a length quantity.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_{test_i} - \lambda_{ref_i}) = \overline{\lambda_{test}} - \overline{\lambda_{ref}} \quad (2)$$

5.3.4 Stability test (if necessary)

The stability of the instrument measuring a single wavelength under normal operating conditions is measured to determine the instrument drift and its contribution to the uncertainty. The measurement duration must be longer than 1 hour (12 hours is recommended). The statistical rejection of outlying points (Annex B) is strongly recommended.

As for the calibration, the number of measurements averaged per reading affects the size of the results file, the rejection of data by the measurement routine and detection of lock failure. A large number of samples per measurement will increase the size of the data set used to check that the extreme data points are valid. If the number of samples is too large then the temporal resolution will be reduced. Also, loss of lock may not be detected. Typically, 50 samples (n) are taken per measurement. The same methodology used in 5.3.5 can be applied to determine the optimum value for n .

The measurement process is as follows:

- a) Allow the equipment to reach equilibrium.
- b) Configure the data acquisition software.
- c) Ensure that the optical source is locked and is operating correctly.
- d) Run the data acquisition software.

If the stability test is done during the calibration, the correction factor should be calculated using these results. If the instrument is not stable, the calibration will not be valid.

The mean centre wavelength for the n measurements of each data point of the stability test is given by:

$$\lambda_{s_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{stest_{i,j}} \quad (3)$$

where λ_{s_i} is the mean wavelength for the i^{th} stability measurement ($i = 1 \dots N$) comprising each of n measurements ($j = 1 \dots n$) and $\lambda_{stest_{i,j}}$ is the measured value.

The contribution of the type A standard uncertainty of each centre wavelength measurement is given by Equation (4) (from Equation (A.3)).

$$u_{stest_i} = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{stest_{i,j}} - \lambda_{s_i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

The uncertainty contribution due to stability can be calculated from Equation (5) and Equation (6).

$$\overline{\lambda_s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{s_i} \quad (5)$$

$$u_s = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{stest_i}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

where u_s is the uncertainty contribution from the stability measurement and N is the number of data points of stability measurements. The number of measurements n for each data point of the stability measurements should be chosen to be sufficiently large such that the second term in Equation (6) becomes negligible in relation to the first term, giving Equation (7).

$$u_s = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

5.3.5 "On/Off repeatability" measurement (optional if a specification is available)

5.3.5.1 General

The measurements using a fixed wavelength reference source may be affected by the "On/Off repeatability" of the wavelength meter internal reference. This test is optional if already done in a qualification of the product. This test may be combined with the connector repeatability measurement (5.3.7) in order to simplify the overall calibration process.

The duration of each measurement must be sufficient that its measurement uncertainty will not significantly increase the uncertainty of the result. The uncertainty contribution determined from this measurement will comprise of a component due to the "On/Off repeatability" of the instrument and a component due to the measurement noise. Averaging is required to ensure that the dominant component of the uncertainty contribution is due to the "On/Off repeatability" of the instrument. The number of averages will depend on the measurement noise and can be calculated using Equation (8). Typical parameters are given in Table 1.

$$n = \frac{\sigma_{rms}^2}{\sigma_{target}^2} \quad (8)$$

where n is the number of averages for each measurement, σ_{rms} and σ_{target} are the estimated rms and target noise contributions. The statistical rejection of outlying points (Annex B) is strongly recommended.

Table 1 – Typical parameters to calculate the "On/Off repeatability" measurement duration

Parameter	Value
Estimated rms noise	1 pm
Target uncertainty contribution	0,05 pm
Number of averages required	400
Measurement rate	1 s ⁻¹
Duration	7 min

5.3.5.2 Measurement process

- Allow the equipment to reach equilibrium.
- Configure the data acquisition software.
- Power down the wavelength meter and ensure that the reference source has turned off completely.
- Wait at least 10 min.
- Turn on the wavelength meter and wait for it to complete its self-checks and stabilization of its reference laser. The time taken for the system to achieve maximum stability may be as long as 1 to 2 h, see manufacturers instructions for guidance.
- Measure the wavelength using data acquisition software to acquire n measurements.
- Turn the wavelength meter off.
- Repeat from c) until at least N sets of measurements have been made.
- "On/Off repeatability" measurement is complete.

The mean centre wavelength for the n measurements of each cycle of the "On/Off repeatability" test is given by:

$$\lambda_{rep_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{test_{i,j}} \quad (9)$$

where λ_{rep_i} is the mean wavelength for the i^{th} "On/Off repeatability" measurement ($i = 1 \dots N$) comprising each of n measurements ($j = 1 \dots n$) and λ_{test} is the measured value.

The contribution of the type A standard uncertainty of each centre wavelength measurement is given by Equation (10) (from Equation (A.3)).

$$u_{test_i} = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{test_{i,j}} - \lambda_{rep_i})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

The uncertainty contribution due to "On/Off repeatability" can be calculated from Equation (11) and Equation (12).

$$\overline{\lambda_{rep}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{rep_i} \quad (11)$$

$$urep = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{rep_i} - \overline{\lambda_{rep}})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

where $urep$ is the uncertainty contribution from the "On/Off repeatability" measurement and N is the number of sets of "On/Off repeatability" measurements. The number of measurements n for each cycle of the "On/Off repeatability" measurements should be chosen to be sufficiently large such that the second term in Equation (12) becomes negligible in relation to the first term, giving Equation (13).

$$urep = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{rep_i} - \overline{\lambda_{rep}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

5.3.6 Wavelength dependence measurement (optional)

5.3.6.1 General

Measurements made over a range of wavelengths will provide an improved correction factor and an improved estimate for the instrument uncertainty. The measurements require a number of transition-locked reference sources, a single source that can be locked to a number of transitions or multiple lines of a frequency comb of known values. This test is not required if the wavelength meter under test is to be used in only one ITU-T band, unless the highest levels of accuracy are required.

The number of measurements for each of the wavelength dependence measurements is calculated using Equation (8).

5.3.6.2 Measurement process

- Allow the equipment to reach equilibrium.
- Configure the data acquisition software.
- Either lock the laser to the reference transition and allow sufficient time for the system to stabilize or connect each of transition-locked references in turn.
- Measure the wavelength using data acquisition software to acquire n measurements.
- Reset the wavelength of the reference source.
- Repeat from c) until N sets of wavelengths, (suggested minimum of 3) have been measured.
- The wavelength dependence measurement is now complete.

The mean centre wavelength for n measurements is given by:

$$\lambda_{wd_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{wtest_{i,j}} \quad (14)$$

where λ_{wd_i} is the mean wavelength for the i^{th} wavelength ($i = 1 \dots N$) performing n measurements ($j = 1 \dots n$) for each and λ_{wtest} is the measured value.

The uncertainty of each centre wavelength measurement is given by Equation (15).

$$uwtest_i = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{wtest_{i,j}} - \lambda_{wd_i})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

The wavelength deviation D_i is defined in Equation (16).

$$D_i = \lambda_{wd_i} - \lambda_{ref_i} \quad (16)$$

The uncertainty contribution due to wavelength dependence can be calculated from Equation (17) and Equation (18).

$$\overline{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (17)$$

$$uwd = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \overline{D})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N uwtest_i^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

where uwd is the uncertainty contribution from the wavelength dependence measurement and N is the number of wavelengths. The number of measurements n for each cycle of the wavelength dependence measurements should be chosen to be sufficiently large such that the second term in Equation (18) becomes negligible in relation to the first term, giving Equation (19).

$$uwd = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \overline{D})^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

5.3.7 Connector repeatability measurement (optional)

5.3.7.1 General

The connector repeatability measurement is required if the optical input to the wavelength meter couples directly to the interferometer, without an intervening optical fibre link. The premise is that small displacements of the optical fibre connector will cause changes to the optical alignment between the reference and unknown optical beams. This test may be combined with the “On/off repeatability” measurement (5.3.5) in order to simplify the overall calibration process.

The number of measurements for each of the connector repeatability measurements is calculated using Equation (8).

5.3.7.2 Measurement process

- Allow the equipment to reach equilibrium.
- Configure the data acquisition software.
- Measure the wavelength using data acquisition software to acquire n measurements.
- Disconnect the optical fibre from the wavelength meter.
- Reconnect the optical fibre to the wavelength meter.
- Repeat from c) until N sets of measurements, typically 10, have been made.

g) The connector repeatability measurement is now complete.

The mean centre wavelength for n measurements is given by:

$$\lambda_{con_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{ctest_{i,j}} \quad (20)$$

where λ_{con_i} is the mean wavelength for the i^{th} connector repeatability measurement ($i = 1 \dots N$) performing n measurements ($j = 1 \dots n$) for each and λ_{ctest} is the measured value.

The uncertainty of each connexion measurement is given by Equation (21).

$$uctest_i = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{ctest_{i,j}} - \lambda_{con_i})^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

The uncertainty contribution due to connector repeatability can be calculated from Equation (22) and Equation (23).

$$\overline{\lambda_{con}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{con_i} \quad (22)$$

$$ucon = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{con_i} - \overline{\lambda_{con}})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N uctest_i^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

where $ucon$ is the uncertainty contribution from the connector measurement and N is the number of sets of measurements. The number of measurements n for each cycle of the connector repeatability measurements should be chosen to be sufficiently large such that the second term in Equation (23) becomes negligible in relation to the first term, giving Equation (24).

$$ucon = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{con_i} - \overline{\lambda_{con}})^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

5.4 Calibration uncertainty

Note that the following list may not be complete. Additional contributions may have to be taken into account, depending on the measurement setup and procedure. The mathematical basis, Annex A, should be used to calculate and state the uncertainty.

- a) Stability measurement
- b) "On/Off repeatability" measurement
- c) Wavelength dependence measurement
- d) Connector repeatability
- e) Uncertainty of the reference standard
- f) Source uncertainty (how well the source is stabilized to the natural standard)
- g) Display resolution of the test wavelength meter

5.5 Reporting the results

The results of each calibration should be reported as required by ISO/IEC 17025. Calibration certificates referring to this standard shall at least include the following information:

- a) All calibration conditions of the calibration process as described in 5.2.
- b) The test meter's correction factor(s) or deviation(s), if the test meter was not adjusted.
- c) On receipt correction factors or deviations **and** after adjustment correction factors or deviations in the case that an adjustment was carried out.
- d) The calibration uncertainty in the form of an expanded uncertainty as described in 5.4 and Annex A.
- e) The instrument state of the test meter during the calibration.
- f) Evidence that the measurements are traceable (see ISO/IEC 17025:2005, 5.10.4.1 c).

6 Absolute power calibration

If the wavelength meter has a power measurement capability then it must be calibrated using the power meter calibration procedure (IEC 61315), while taking into account the restrictions on moving the instrument (4.3).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annex A (normative)

Mathematical basis

A.1 General

This annex summarizes the form of evaluating, combining and reporting the uncertainty of measurement. It is based on the ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. It does not relieve the need to consult this guide for more advice.

This document distinguishes two types of evaluation of uncertainty of measurement. Type A is the method of evaluation of uncertainty by the statistical analysis of a series of measurements on the same measurand. Type B is the method of evaluation of uncertainty based on other knowledge.

A.2 Type A evaluation of uncertainty

The type A evaluation of standard uncertainty can be applied when several independent observations have been made for a quantity under the same conditions of measurement.

For a quantity X estimated from n independent repeated observations X_i , the arithmetic mean is:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (\text{A.1})$$

This mean is used as the estimate of the quantity, that is $x = \bar{X}$. The experimental standard deviation of the observations is given by:

$$s(X) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

where

$\bar{X}$ is the arithmetic mean of the observed values;

X_i are the measurement samples of a series of measurements;

n is the number of measurements, it is assumed to be large, for example, $n \geq 10$.

The type A standard uncertainty $u_{\text{typeA}}(x)$ associated with the estimate x is the experimental standard deviation of the mean:

$$u_{\text{typeA}}(x) = s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

A.3 Type B evaluation of uncertainty

The type B evaluation of standard uncertainty is the method of evaluating the uncertainty by means other than the statistical analysis of a series of observations. It is evaluated by scientific judgement based on all available information on the variability of the quantity.

If the estimate x of a quantity X is taken from a manufacturer's specification, calibration certificate, handbook, or other source and its quoted uncertainty $U(x)$ is stated to be a multiple k of a standard deviation, the standard uncertainty $u(x)$ is simply the quoted value divided by the multiplier.

$$u(x) = U(x) / k \quad (\text{A.4})$$

If only upper and lower limit $X_{\max}$ and $X_{\min}$ can be estimated for the value of the quantity X (for example a manufacturer's specifications or a temperature range), a rectangular probability distribution is assumed; the estimated value is

$$x = \frac{1}{2} (X_{\max} + X_{\min}) \quad (\text{A.5})$$

and the standard uncertainty is

$$u(x) = \frac{1}{2\sqrt{3}} (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{A.6})$$

The contribution to the standard uncertainty associated with the output estimate y resulting from the standard uncertainty associated with the input estimate x is

$$u(y) = c \cdot u(x) \quad (\text{A.7})$$

where c is the sensitivity coefficient associated with the input estimate x .

A.4 Determining the combined standard uncertainty

The combined standard uncertainty is used to collect a number of individual uncertainties into a single number. The combined standard uncertainty is based on statistical independence of the individual uncertainties; it is calculated by root-sum-squaring all standard uncertainties obtained from type A and type B evaluation:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (\text{A.8})$$

where

- i is the current number of individual contribution;
- $u_i(y)$ are the standard uncertainty contributions;
- N is the number of uncertainties.

NOTE It is acceptable to neglect uncertainty contributions to this equation which are smaller than 1/10 of the largest contribution, because squaring them will reduce their significance to 1/100 of the largest contribution.

When the quantities above are to be used as the basis for further uncertainty computations, then the combined standard uncertainty, u_c , can be re-inserted into Equation (A.8). In spite of its partially type A origin, u_c should be considered as describing an uncertainty type B.

A.5 Reporting uncertainties

In calibration reports and technical data sheets, combined standard uncertainties shall be reported in the form of expanded uncertainties, together with the applicable level of confidence. Correction factors or deviations shall be reported. The expanded uncertainty U is obtained by multiplying the standard uncertainty $u_c(y)$ by a coverage factor k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (\text{A.9})$$

For a level of confidence of approximately 95 %, the default level, then $k = 2$. If a level of confidence of approximately 99 % is chosen, then $k = 3$. The above values for k are valid under some conditions (see ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*); if these conditions are not met, larger coverage factors are to be used to reach these levels of confidence.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annex B (informative)

Rejection of outliers

B.1 Overview

Wavelength meters can, on occasion, give spurious wavelength readings that are far removed from the true value. This can be caused by factors such as laser coherence, modulation of the optical power level, or incorrect operation of the fringe multiplier system. If these outliers are not removed then the mean values will be biased and the standard deviation of the data set will be over estimated.

B.2 Assumptions

The analysis requires that a sample of the data used to obtain an estimate of the mean should be sufficiently large that the estimate for the standard deviation will be realistic. However, there is a trade-off between the statistical confidence, the sample size and the acquisition time.

B.3 Measurement and analysis procedure

If the presence of outliers in a data set is suspected, the recommended procedure is to apply Grubbs' Test [1], [2], [3]¹.

- a) Acquire a data set.
- b) Calculate the mean and standard deviation of the sample.
- c) Taking the data point x_{ext} farthest from the mean, calculate Z from Equation (B.1):

$$Z = \frac{|x_{\text{ext}} - \bar{x}|}{s(x)} \quad (\text{B.1})$$

where $s(x)$ is given by Equation (A.2).

- d) Compare the value of Z with the critical values Z_c listed in Table B.1. If Z is $> Z_c$ then there is a 95 % probability that the extreme value x_{ext} is an outlier. Reject this value and repeat steps b) to d) until $Z < Z_c$ for the appropriate sample size N . When $Z < Z_c$, it is assumed that all the data values in the sample are valid readings.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

Table B.1 – Critical values Z_c as a function of sample size N

N	Z_c	N	Z_c
3	1,15	27	2,86
4	1,48	28	2,88
5	1,71	29	2,89
6	1,89	30	2,91
7	2,02	31	2,92
8	2,13	32	2,94
9	2,21	33	2,95
10	2,29	34	2,97
11	2,34	35	2,98
12	2,41	36	2,99
13	2,46	37	3,00
14	2,51	38	3,01
15	2,55	39	3,03
16	2,59	40	3,04
17	2,62	50	3,13
18	2,65	60	3,20
19	2,68	70	3,26
20	2,71	80	3,31
21	2,73	90	3,35
22	2,76	100	3,38
23	2,78	110	3,42
24	2,80	120	3,44
25	2,82	130	3,47
26	2,84	140	3,49

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annex C (informative)

Example of a single wavelength calibration

The figures presented here refer to a wavelength meter and an external cavity laser, locked to an absorption transition (R19) in CO at 13,6 hPa with a wavelength of 1 561,257 709 ± 0,000 026 nm.

C.1 Stability measurement

The typical uncertainty budget for the Type A contributions of a stability measurement is shown in Table C.1.

Table C.1 – Type A uncertainty contributions for a stability measurement

Symbol	Source of uncertainty	Value	PDF	Divisor	u_i
		fm			fm
u_{as}	Individual measurement Type A	1,85	Gaussian	1	1,85
u_{bs}	Stability of the centre wavelength	1,78	Gaussian	1	1,78
	Combined uncertainty u_s	2,57			

Where the parameters u_{as} and u_{bs} are the two terms of Equation (6) such that:

$$u_{as} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.1)$$

and

$$u_{bs} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.2)$$

C.2 "On/Off repeatability" measurement

The typical uncertainty budget for a "On/Off repeatability" measurement is shown in Table C.2. The uncertainty contributions from the individual measurements are small compared to the "On/Off repeatability" of the centre wavelength.

Table C.2 – Uncertainty contributions for a "On/Off repeatability" measurement

Symbol	Source of uncertainty	Value fm	PDF	Divisor	u_i fm
u_{ar}	Individual measurement Type A	7,7	Gaussian	1	7,7
u_{br}	"On/Off repeatability" of centre wavelengths	26,0	Gaussian	1	26
	Combined uncertainty u_{rep}	27,1			

Where the parameters u_a and u_r are the two terms of Equation (12) such that:

$$u_{ar} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.3)$$

and

$$u_{br} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{rep_i} - \overline{\lambda_{rep}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.4)$$

C.3 Wavelength dependence measurement

The typical results and uncertainty budget for a wavelength dependence measurement are shown in Table C.3. The uncertainty contributions from the individual measurements are small compared to the wavelength dependence of the centre wavelength.

Table C.3 – Uncertainty budget for wavelength dependence

Parameter	Line	Difference fm	Uncertainty fm
	P(27)	-7,3	7,6
	P(28)	-5,8	7,7
	P(29)	-44,1	7,8
	P(30)	-15,7	7,7
	P(31)	-39,9	7,5
	P(32)	-13,9	7,6
	P(33)	-21,6	7,4
First term of Equation 17			15,2
Second term of Equation 17			7,6
Wavelength dependence uncertainty u_{wd}			17,0

C.4 Wavelength meter calibration results

The results from the "On/Off repeatability" (which were obtained including the contribution from connector repeatability) and stability tests are combined with the uncertainty of the reference to give the total uncertainty for the measurement as shown in Table C.4. Contributions to the uncertainty budget due to imperfect locking of the laser to the transition have not been included explicitly. It has been assumed that these contributions will increase the Stability Type A component of the budget. The Type B contribution is due to the display resolution of the test wavelength meter.

Table C.4 – Uncertainty budget for the wavelength meter calibration

Source of uncertainty	Value fm	PDF	Divisor	u_i fm
Reference	13,1	Gaussian	1	13,1
"On/Off repeatability" u_{rep}	27,1	Gaussian	1	27,1
Wavelength dependence uncertainty u_{wd}	17,0	Gaussian	1	17,0
Stability Type A u_s	2,57	Gaussian	1	2,57
Type B	100	Rectangular	$\sqrt{3}$	57,7
Combined uncertainty u_c				67,3
Expanded uncertainty U				134,6

Annex D (informative)

ITU wavelength bands

The key telecommunication bands, defined by the ITU, are listed in Table D.1.

Table D.1 – The ITU-T bands in different units

Band	Descriptor	Start			Stop		
		nm	GHz	cm ⁻¹	nm	GHz	cm ⁻¹
O-band	Original	1 260	237 931	7 937	1 360	220 436	7 353
E-band	Extended	1 360	220 436	7 353	1 460	205 337	6 849
S-band	Short wavelength	1 460	205 337	6 849	1 530	195 943	6 536
C-band	Conventional	1 530	195 943	6 536	1 565	191 561	6 390
L-band	Long wavelength	1 565	191 561	6 390	1 625	184 488	6 154
U-band	Ultralong wavelength	1 625	184 488	6 154	1 675	178 981	5 970

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annex E (informative)

Atomic and molecular reference transitions

E.1 Overview

This annex provides lists of laser lines, absorption features, and opto-galvanic transitions that are known to sufficient accuracy to provide wavelength reference points for wavelength meter calibration. These tables give the vacuum wavelengths of the dominant transitions only. Other transitions with precisely known vacuum wavelengths may also be used.

E.2 General

Gas laser lines, such as those listed in E.3 for the helium-neon laser, provide intense (>1 mW) and well-defined wavelength (frequency) sources. However, the helium-neon laser's wavelength may deviate from the centre of the gain curve by up to about 2 parts in 10^6 (400 MHz at 1 523,488 nm) unless the laser cavity length is stabilized so that the emission is locked to a known point on the gain curve.

At low gas pressures, atomic or molecular absorption and emission lines are typically several hundred megahertz to a few gigahertz wide due to Doppler broadening. These transitions are normally used to stabilize the wavelength of a semiconductor laser and provide an active reference.

The centre wavelength of an atomic or molecular line will both shift and broaden with increasing gas pressure. It is therefore important to know the associated pressure shift and cell pressure when calculating the expected centre wavelength.

At high optical powers it is possible to saturate an atomic or molecular transition by using two counter-propagating optical beams. The natural linewidth of the transition may be significantly narrower than the Doppler broadened width. Doppler-free transitions offer the potential to provide the highest accuracy frequency references. In molecular absorptions, saturation often requires relatively high powers but the linewidths can be < 1 MHz. Strong atomic transitions out of the ground state or between excited states can be saturated at quite modest optical powers. However, the width of the saturated dip is considerably wider (5 MHz to 150 MHz).

E.3 Helium-neon laser lines

E.3.1 General

A He-Ne laser operates at a frequency near the centre of the Doppler-broadened neon gain curve. The exact frequency or vacuum wavelength of the laser depends on two factors:

- a) the wavelength difference between the actual operating point and the centre of the gain curve and
- b) the exact location of the centre of the curve.

The first factor above will probably never exceed ± 2 parts in 10^6 (hereafter written as $\pm 2/10^6$) for lasers of realistic design. The Doppler width of the gain curve at half-height is about $\pm 1,5/10^6$ and one would not expect the laser to operate far outside this range. The value $\pm 2/10^6$ is a conservative estimate of the range except (possibly) for tubes that have been enriched in ^{22}Ne in order to broaden the gain curve.

The wavelength corresponding to the centre of the gain curve depends slightly on gas pressure and more significantly on the isotope of neon used in the tube. This isotope shift is discussed below for the 632,99, 1 152,6, and 1 523,5 nm lines, and Table E.1 shows the vacuum wavelength and frequency values of these lines with the corresponding uncertainty.

E.3.2 632,991 nm helium-neon line summary

For ^{20}Ne , the centre of the gain curve of the standard red transition ($3s_2 \rightarrow 2p_4$) lies within $1/10^7$ of 632,991 4 nm [4], with the exact value depending on gas pressure. For ^{22}Ne , the centre of this gain curve is shifted toward shorter wavelengths by about 2 parts in 10^6 [5]. Thus, if the laser tube is filled with ^{20}Ne , the vacuum wavelength of a laser is 632,991 4 nm with a conservative estimate of the expanded uncertainty (coverage factor $k=2$; i.e., 2σ) being $2/10^6$. Existing evidence indicates that tubes filled with natural neon (approximately 90% ^{20}Ne and 10% ^{22}Ne) will also fall within $2/10^6$ of this wavelength. The situation is a bit less clear for tubes containing more ^{22}Ne , but in any event, even if the ^{22}Ne content is entirely unknown, the wavelength must lie within $\pm 3/10^6$ of 632,990 8 nm, a value approximately half way between the centres of the ^{20}Ne and ^{22}Ne gain curves.

It must be verified that the laser operates on the standard red transition ($3s_2 \rightarrow 2p_4$). Almost all commercially produced red He-Ne lasers operate on this line, but operation near 640 nm or 612 nm is also possible. If there is any doubt, it would be good to verify with the manufacturer that your particular laser model is indeed a 633 nm laser and not a 640 nm or 612 nm laser.

E.3.3 1 152,590 nm helium-neon line summary

If the laser tube is filled with ^{20}Ne , the vacuum wavelength of a laser operating on the 1 152,59 nm transition ($2s_2 \rightarrow 2p_4$) is 1 152,590 2 nm [6] with a conservative estimate of the expanded uncertainty being $2/10^6$. For ^{22}Ne , the centre of this gain curve is shifted toward shorter wavelengths by about 1 part in 10^6 [7]. In the situation where the ^{22}Ne content is entirely unknown, the wavelength must lie within $\pm 2,5$ parts in 10^6 of 1 152,589 6 nm, a value approximately half way between the centres of the ^{20}Ne and ^{22}Ne gain curves.

E.3.4 1 523,488 nm helium-neon line summary

If the laser tube is filled with ^{20}Ne , the vacuum wavelength of a laser operating on the 1 523,488 nm transition ($2s_2 \rightarrow 2p_1$) is 1 523,488 0 nm [8] with a conservative estimate of the expanded uncertainty being $2/10^6$. For ^{22}Ne , the centre of this gain curve is shifted toward shorter wavelengths by about 1 part in 10^6 [8]. In the situation where the ^{22}Ne content is entirely unknown, the wavelength must lie within $\pm 2,5$ parts in 10^6 of 1 523,487 2 nm, a value approximately half way between the centres of the ^{20}Ne and ^{22}Ne gain curves.

Table E.1 – Helium-neon laser lines

^{20}Ne Isotope		Unknown ratio of ^{22}Ne to ^{20}Ne	
Wavelength nm	Frequency GHz	Wavelength nm	Frequency GHz
632,991 4(13)	473 612,2(9)	632,990 8(19)	473 612,7(1,4)
1 152,590(2)	260 103,2(5)	1 152,589(3)	260 103,4(7)
1 523,488(3)	196 780,3(4)	1 523,487(4)	196 780,4(5)

NOTE 1 Vacuum wavelength and optical frequency of selected helium-neon laser lines.

NOTE 2 Uncertainties in parentheses are expanded uncertainties (coverage factor $k=2$; i.e., 2σ).

E.4 Absorption lines

E.4.1 General

There are numerous atomic and molecular absorption lines in the visible and near IR regions. All infrared active molecules have overtone absorption bands, and molecules with three or more atoms in addition have combination bands where two or more vibrational modes are excited simultaneously. Very often such bands will extend over the near infrared wavelength range of interest for optical telecommunication wavelength standards. The uncertainty stated in the tables is the expanded uncertainty (2σ).

E.4.2 Acetylene

E.4.2.1 General

Acetylene has so far been shown to be one of the most suitable molecules and the most widely used as a wavelength reference. Various carbon and deuterium isotopomers have been investigated and the Mise en pratique of the Consultative Committee for Length (metre convention) recommended an acetylene transition ($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ P(16)) as a reference in the telecomms' region with a provisional uncertainty of 0,010 MHz.

E.4.2.2 Acetylene $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$

This molecule has been used in self-contained units [9],[10],[11] as certified reference material [9],[12]. Pressure-induced shift and broadening have been measured for 15 lines of the $\nu_1 + \nu_3$ band [12]. There have been performed numerous FTIR and laser spectroscopic studies of the band involved and saturated absorption has been observed [13],[14],[15],[16],[17] allowing for very accurate determination of the molecular transition frequencies [18]. Vacuum wavelengths (nm) of absorption lines in the $\nu_1 + \nu_3$ band of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ are given in Table E.2.

Table E.2 – Centre vacuum wavelengths for acetylene $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 545,175 602 1	0,000 1	194 018,374 09	0,01	P(31)
1 544,434 617 1	0,000 1	194 111,459 74	0,01	P(30)
1 543,700 140 8	0,000 1	194 203,815 94	0,01	P(29)
1 542,972 171 8	0,000 1	194 295,440 63	0,01	P(28)
1 542,250 705 0	0,000 1	194 386,332 28	0,01	P(27)
1 541,535 739 1	0,000 1	194 476,488 86	0,01	P(26)
1 540,827 258 5	0,000 1	194 565,910 19	0,01	P(25)
1 540,125 271 0	0,000 1	194 654,593 13	0,01	P(24)
1 539,429 767 3	0,000 1	194 742,536 72	0,01	P(23)
1 538,740 743 0	0,000 1	194 829,739 42	0,01	P(22)
1 538,058 193 5	0,000 1	194 916,199 70	0,01	P(21)
1 537,382 114 2	0,000 1	195 001,916 07	0,01	P(20)
1 536,712 500 3	0,000 1	195 086,887 07	0,01	P(19)
1 536,049 347 4	0,000 1	195 171,111 21	0,01	P(18)
1 535,392 650 7	0,000 1	195 254,587 07	0,01	P(17)
1 534,742 405 7	0,000 1	195 337,313 21	0,01	P(16)
1 534,098 607 7	0,000 1	195 419,288 24	0,01	P(15)
1 533,461 252 1	0,000 1	195 500,511 75	0,01	P(14)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 532,830 334 3	0,000 1	195 580,979 37	0,01	P(13)
1 532,205 849 8	0,000 1	195 660,692 74	0,01	P(12)
1 531,587 793 9	0,000 1	195 739,649 52	0,01	P(11)
1 530,976 162 2	0,000 1	195 817,848 38	0,01	P(10)
1 530,370 950 0	0,000 1	195 895,288 00	0,01	P(9)
1 529,772 152 9	0,000 1	195 971,967 08	0,01	P(8)
1 529,179 766 4	0,000 1	196 047,884 35	0,01	P(7)
1 528,593 786 1	0,000 1	196 123,038 52	0,01	P(6)
1 528,014 207 6	0,000 1	196 197,428 35	0,01	P(5)
1 527,441 026 4	0,000 1	196 271,052 58	0,01	P(4)
1 526,874 238 2	0,000 1	196 343,910 00	0,01	P(3)
1 526,313 838 6	0,000 1	196 415,999 39	0,01	P(2)
1 525,759 823 4	0,000 1	196 487,319 56	0,01	P(1)
1 524,670 929 2	0,000 1	196 627,647 48	0,01	R(0)
1 524,136 041 7	0,000 1	196 696,652 92	0,01	R(1)
1 523,607 521 8	0,000 1	196 764,884 47	0,01	R(2)
1 523,085 365 3	0,000 1	196 832,341 01	0,01	R(3)
1 522,569 568 0	0,000 1	196 899,021 43	0,01	R(4)
1 522,060 126 0	0,000 1	196 964,925 63	0,01	R(5)
1 521,557 035 3	0,000 1	197 030,049 52	0,01	R(6)
1 521,060 291 7	0,000 1	197 094,395 03	0,01	R(7)
1 520,569 891 4	0,000 1	197 157,960 12	0,01	R(8)
1 520,085 830 3	0,000 1	197 220,743 74	0,01	R(9)
1 519,608 104 7	0,000 1	197 282,744 86	0,01	R(10)
1 519,136 710 5	0,000 1	197 343,962 48	0,01	R(11)
1 518,671 643 9	0,000 1	197 404,395 61	0,01	R(12)
1 518,212 901 0	0,000 1	197 464,043 28	0,01	R(13)
1 517,760 478 2	0,000 1	197 522,904 51	0,01	R(14)
1 517,314 371 3	0,000 1	197 580,978 38	0,01	R(15)
1 516,874 576 8	0,000 1	197 638,263 95	0,01	R(16)
1 516,441 090 8	0,000 1	197 694,760 33	0,01	R(17)
1 516,013 909 5	0,000 1	197 750,466 61	0,01	R(18)
1 515,593 029 1	0,000 1	197 805,381 94	0,01	R(19)
1 515,178 445 9	0,000 1	197 859,505 46	0,01	R(20)
1 514,770 156 1	0,000 1	197 912,836 34	0,01	R(21)
1 514,368 155 8	0,000 1	197 965,373 77	0,01	R(22)
1 513,972 441 3	0,000 1	198 017,116 98	0,01	R(23)
1 513,583 013 1	0,000 1	198 068,064 60	0,01	R(24)
1 513,199 855 5	0,000 1	198 118,217 44	0,01	R(25)
1 512,822 975 5	0,000 1	198 167,573 37	0,01	R(26)
1 512,452 366 1	0,000 1	198 216,132 11	0,01	R(27)
1 512,088 024 1	0,000 1	198 263,892 86	0,01	R(28)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 511,729 942 5	0,000 1	198 310,855 39	0,01	R(29)
1 511,378 113 4	0,000 1	198 357,019 56	0,01	R(30)
1 511,032 608 1	0,000 1	198 402,374 90	0,01	R(31)

E.4.2.3 Acetylene $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$

The $\nu_1 + \nu_3$ band in this isotopomer is weaker than the equivalent band in $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$. The absorptions are shifted to longer wavelengths covering most of the C-band. As part of a more extensive study of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ the line strengths, collision-broadening parameters, and pressure shifts have been determined [19]. A list of centre vacuum wavelengths for the $\nu_1 + \nu_3$ and $\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$ combination bands is shown in Table E.3, along with their associated frequency values [14], [20]. Heterodyne measured frequencies can be found in [13], [14], [15], [16], [17].

**Table E.3 – Frequency and vacuum wavelength values
for the $\nu_1 + \nu_3$ and $\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$ bands of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$**

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Band	Transition
1 516,585 0	0,2	197 676,001	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(40)
1 516,876 2	0,2	197 638,053	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(39)
1 517,173 5	0,2	197 599,324	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(38)
1 517,476 9	0,2	197 559,817	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(37)
1 517,785 4	0,2	197 519,661	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(36)
1 518,094 5	0,2	197 479,444	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(35)
1 518,343 9	0,2	197 447,007	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(25)
1 518,420 4	0,2	197 437,059	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(34)
1 518,725 9	0,2	197 397,343	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(24)
1 518,746 9	0,2	197 394,614	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(33)
1 519,078 8	0,2	197 351,486	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(32)
1 519,114 7	0,2	197 346,822	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(23)
1 519,416 9	0,2	197 307,571	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(31)
1 519,510 0	0,2	197 295,482	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(22)
1 519,760 8	0,2	197 262,923	24	$\nu_1 + \nu_3$	R(30)
1 519,911 9	0,2	197 243,313	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(21)
1 520,110 578 4	0,000 1	197 217,532 90	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(29)
1 520,320 082 9	0,000 1	197 190,355 74	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(20)
1 520,466 234 1	0,000 1	197 171,401 29	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(28)
1 520,734 712 9	0,000 1	197 136,591 58	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(19)
1 520,827 966 9	0,000 1	197 124,503 57	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(27)
1 521,155 617 0	0,000 1	197 082,043 84	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(18)
1 521,194 963 4	0,000 1	197 076,946 23	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(26)
1 521,568 164 3	0,000 1	197 028,608 40	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(25)
1 521,582 677 4	0,000 1	197 026,729 11	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(17)
1 521,947 174 3	0,000 1	196 979,542 43	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(24)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Band	Transition
1 522,015 774 4	0,000 1	196 970,664 19	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(16)
1 522,332 022 1	0,000 1	196 929,745 71	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(23)
1 522,454 783 6	0,000 1	196 913,866 49	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(15)
1 522,722 619 1	0,000 1	196 879,230 82	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(22)
1 522,899 578 5	0,000 1	196 856,353 65	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(14)
1 523,119 058 2	0,000 1	196 827,986 88	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(21)
1 523,350 033 4	0,000 1	196 798,143 19	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(13)
1 523,521 287 8	0,000 1	196 776,021 71	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(20)
1 523,806 024 9	0,000 1	196 739,252 31	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(12)
1 523,929 301 4	0,000 1	196 723,337 31	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(19)
1 524,267 433 9	0,000 1	196 679,697 62	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(11)
1 524,343 090 6	0,000 1	196 669,935 95	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(18)
1 524,734 147 1	0,000 1	196 619,495 00	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(10)
1 524,762 647 1	0,000 1	196 615,819 89	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(17)
1 525,187 962 9	0,000 1	196 560,991 36	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(16)
1 525,206 057 5	0,000 1	196 558,659 43	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(9)
1 525,619 030 8	0,000 1	196 505,452 50	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(15)
1 525,683 065 9	0,000 1	196 497,204 89	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(8)
1 526,055 846 8	0,000 1	196 449,205 07	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(14)
1 526,165 081 3	0,000 1	196 435,144 32	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(7)
1 526,498 389 1	0,000 1	196 392,253 10	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(13)
1 526,652 021 4	0,000 1	196 372,489 47	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(6)
1 526,946 677 3	0,000 1	196 334,595 35	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(12)
1 527,143 812 8	0,000 1	196 309,250 96	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(5)
1 527,400 694 4	0,000 1	196 276,235 24	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(11)
1 527,640 391 3	0,000 1	196 245,438 20	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(4)
1 527,860 439 3	0,000 1	196 217,174 21	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(10)
1 528,141 702 0	0,000 1	196 181,059 39	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(3)
1 528,325 910 4	0,000 1	196 157,413 78	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(9)
1 528,647 699 3	0,000 1	196 116,121 55	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(2)
1 528,797 149 3	0,000 1	196 096,949 90	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(8)
1 529,158 346 9	0,000 1	196 050,630 48	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(1)
1 529,274 006 2	0,000 1	196 035,803 12	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(7)
1 529,673 617 7	0,000 1	195 984,590 79	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	R(0)
1 529,756 623 4	0,000 1	195 973,956 52	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(6)
1 530,244 927 1	0,000 1	195 911,420 90	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(5)
1 530,717 967 2	0,000 1	195 850,878 11	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(1)
1 530,738 886 5	0,000 1	195 848,201 58	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(4)
1 531,238 454 0	0,000 1	195 784,305 97	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(3)
1 531,247 038 0	0,000 1	195 783,208 43	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(2)
1 531,743 566 1	0,000 1	195 719,743 58	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(2)
1 531,780 716 6	0,000 1	195 714,996 77	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(3)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Band	Transition
1 532,254 147 4	0,000 1	195 654,525 40	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(1)
1 532,319 022 2	0,000 1	195 646,241 85	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(4)
1 532,770 121 5	0,000 1	195 588,662 51	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	R(0)
1 532,861 983 5	0,000 1	195 576,941 19	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(5)
1 533,409 638 9	0,000 1	195 507,091 12	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(6)
1 533,818 025 0	0,000 1	195 455,036 46	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(1)
1 533,962 036 2	0,000 1	195 436,686 78	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(7)
1 534,349 921 7	0,000 1	195 387,280 14	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(2)
1 534,519 232 9	0,000 1	195 365,722 10	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(8)
1 534,887 155 1	0,000 1	195 318,891 69	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(3)
1 535,081 296 2	0,000 1	195 294,189 79	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(9)
1 535,429 792 6	0,000 1	195 249,863 88	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(4)
1 535,648 302 9	0,000 1	195 222,081 41	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(10)
1 535,977 915 7	0,000 1	195 180,187 77	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(5)
1 536,220 339 4	0,000 1	195 149,387 30	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(11)
1 536,531 605 6	0,000 1	195 109,854 50	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(6)
1 536,797 501 5	0,000 1	195 076,096 69	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(12)
1 537,090 931 7	0,000 1	195 038,856 72	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(7)
1 537,379 893 5	0,000 1	195 002,197 74	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(13)
1 537,655 947 7	0,000 1	194 967,189 15	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(8)
1 537,967 628 4	0,000 1	194 927,677 58	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(14)
1 538,226 690 7	0,000 1	194 894,848 60	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(9)
1 538,560 826 3	0,000 1	194 852,522 48	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(15)
1 538,803 241 5	0,000 1	194 821,826 42	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(10)
1 539,159 613 8	0,000 1	194 776,717 97	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(16)
1 539,385 461 9	0,000 1	194 748,141 66	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(11)
1 539,764 122 4	0,000 1	194 700,248 98	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(17)
1 539,973 510 0	0,000 1	194 673,775 91	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(12)
1 540,374 487 0	0,000 1	194 623,100 11	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(18)
1 540,567 349 8	0,000 1	194 598,735 35	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(13)
1 540,990 843 8	0,000 1	194 545,255 87	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(19)
1 541,166 989 1	0,000 1	194 523,020 61	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(14)
1 541,613 327 6	0,000 1	194 466,700 98	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(20)
1 541,772 435 5	0,000 1	194 446,632 39	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(15)
1 542,242 069 1	0,000 1	194 387,420 76	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(21)
1 542,383 712 4	0,000 1	194 369,569 39	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(16)
1 542,877 197 8	0,000 1	194 307,400 77	0,01	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(22)
1 543,000 806 1	0,000 1	194 291,834 99	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(17)
1 543,518 7	0,2	194 226,645	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(23)
1 543,623 745 3	0,000 1	194 213,427 28	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(18)
1 544,166 9	0,2	194 145,114	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(24)
1 544,252 540 4	0,000 1	194 134,346 65	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(19)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Band	Transition
1 544,823 2	0,2	194 062,633	24	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$	P(25)
1 544,887 205 3	0,000 1	194 054,593 10	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(20)
1 545,527 754 6	0,000 1	193 974,166 50	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(21)
1 546,174 203 4	0,000 1	193 893,066 73	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(22)
1 546,826 566 9	0,000 1	193 811,293 67	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(23)
1 547,484 858 3	0,000 1	193 728,847 42	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(24)
1 548,149 137 7	0,000 1	193 645,722 30	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(25)
1 548,819 315 7	0,000 1	193 561,931 32	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(26)
1 549,495 490 6	0,000 1	193 477,464 00	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(27)
1 550,177 639 4	0,000 1	193 392,325 10	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(28)
1 550,866 180 1	0,000 1	193 306,464 37	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(29)
1 551,560 141 4	0,000 1	193 220,004 82	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(30)
1 552,260 375 9	0,000 1	193 132,842 06	0,01	$\nu_1 + \nu_3$	P(31)
1 552,966 8	0,2	193 044,989	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(32)
1 553,678 6	0,2	192 956,547	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(33)
1 554,397 5	0,2	192 867,306	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(34)
1 555,122 1	0,2	192 777,440	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(35)
1 555,853 3	0,2	192 686,841	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(36)
1 556,589 4	0,2	192 595,721	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(37)
1 557,332 1	0,2	192 503,871	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(38)
1 558,082 0	0,2	192 411,220	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(39)
1 558,836 9	0,2	192 318,041	24	$\nu_1 + \nu_3$	P(40)

E.4.3 HCN

HCN is a strong absorber in the C band. Although this molecule is toxic, the quantity contained in a well-designed gas cell is below the toxic limit.

The $2\nu_1$ overtone band of the $\text{H}^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ (1,52 μm to 1,55 μm) and $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ (1,53 μm to 1,56 μm) isotopomers has been studied [21] and pressure shift values have been measured [22]. The vacuum wavelength values reported in Reference [23] are listed in Table E.4.

Table E.4 – List of H^{13}CN transitions

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 527,221 633	0,025	196 299,247 9	3,2	R(27)
1 527,633 273	0,018	196 246,352 6	2,3	R(26)
1 528,054 581	0,013	196 192,244 5	1,6	R(25)
1 528,485 564	0,010	196 136,924 7	1,3	R(24)
1 528,926 231	0,009	196 080,394 1	1,1	R(23)
1 529,376 588	0,008	196 022,654 2	1,0	R(22)
1 529,836 645	0,008	195 963,705 7	1,0	R(21)
1 530,306 408	0,008	195 903,550 1	1,0	R(20)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 530,785 886	0,008	195 842,188 5	1,0	R(19)
1 531,275 088	0,008	195 779,622 1	1,0	R(18)
1 531,774 020	0,008	195 715,852 4	1,0	R(17)
1 532,282 693	0,008	195 650,880 5	1,0	R(16)
1 532,801 112	0,008	195 584,708 1	1,0	R(15)
1 533,329 289	0,008	195 517,336 1	1,0	R(14)
1 533,867 229	0,008	195 448,766 6	1,0	R(13)
1 534,414 943	0,008	195 379,000 6	1,0	R(12)
1 534,972 439	0,008	195 308,039 7	1,0	R(11)
1 535,539 724	0,008	195 235,885 7	1,0	R(10)
1 536,116 810	0,008	195 162,539 8	1,0	R(9)
1 536,703 703	0,008	195 088,003 9	1,0	R(8)
1 537,300 413	0,008	195 012,279 6	1,0	R(7)
1 537,906 949	0,008	194 935,368 6	1,0	R(6)
1 538,523 321	0,008	194 857,272 5	1,0	R(5)
1 539,149 536	0,008	194 777,993 3	1,0	R(4)
1 539,785 605	0,008	194 697,532 6	1,0	R(3)
1 540,431 537	0,008	194 615,892 2	1,0	R(2)
1 541,087 341	0,008	194 533,074 2	1,0	R(1)
1 541,753 028	0,008	194 449,080 1	1,0	R(0)
1 543,114 084	0,008	194 277,572 3	1,0	P(1)
1 543,809 47	0,008	194 190,062 3	1,0	P(2)
1 544,514 78	0,008	194 101,384 5	1,0	P(3)
1 545,230 03	0,008	194 011,540 8	1,0	P(4)
1 545,955 21	0,008	193 920,533 0	1,0	P(5)
1 546,690 34	0,008	193 828,363 7	1,0	P(6)
1 547,435 44	0,008	193 735,034 9	1,0	P(7)
1 548,190 50	0,008	193 640,548 8	1,0	P(8)
1 548,955 55	0,008	193 544,907 3	1,0	P(9)
1 549,730 59	0,008	193 448,113 2	1,0	P(10)
1 550,515 63	0,008	193 350,168 4	1,0	P(11)
1 551,310 69	0,008	193 251,075 3	1,0	P(12)
1 552,115 77	0,008	193 150,836 3	1,0	P(13)
1 552,930 88	0,008	193 049,453 8	1,0	P(14)
1 553,756 04	0,008	192 946,930 2	1,0	P(15)
1 554,591 26	0,008	192 843,268 0	1,0	P(16)
1 555,436 54	0,008	192 738,469 5	1,0	P(17)
1 556,291 90	0,008	192 632,537 5	1,0	P(18)
1 557,157 35	0,008	192 525,474 3	1,0	P(19)
1 558,032 91	0,008	192 417,282 7	1,0	P(20)
1 558,918 57	0,008	192 307,965 3	1,0	P(21)

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 559,814 36	0,008	192 197,524 6	1,0	P(22)
1 560,720 28	0,008	192 085,963 3	1,0	P(23)
1 561,636 35	0,009	191 973,284 3	1,1	P(24)
1 562,562 57	0,010	191 859,490 3	1,2	P(25)
1 563,498 96	0,013	191 744,584 0	1,6	P(26)
1 564,445 53	0,018	191 628,568 4	2,2	P(27)
1 565,402 30	0,025	191 511,446 2	3,1	P(28)

E.4.4 CO

This diatomic molecule has a 0→3 CO overtone band in the L-band. The molecule has a regular spectrum for which the lines are easy to identify [24], [25]. The line-strength, pressure shift and pressure broadening characteristics of a number of lines have been measured [26], [27], [28], [29]. The transitions for $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ are given in Table E.5.

Table E.5 – List of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ transitions

Wavelength nm	Uncertainty pm	Frequency GHz	Uncertainty MHz	Transition
1 559,562 335	0,004	192 228,583	0,5	R(24)
1 559,848 373	0,004	192 193,333	0,5	R(23)
1 560,160 931	0,004	192 154,830	0,5	R(22)
1 560,500 006	0,003	192 113,077	0,4	R(21)
1 560,865 596	0,003	192 068,080	0,4	R(20)
1 561,257 704	0,003	192 019,842	0,4	R(19)
1 561,676 332	0,003	191 968,369	0,4	R(18)
1 562,121 489	0,003	191 913,664	0,4	R(17)
1 562,593 183	0,003	191 855,731	0,4	R(16)
1 563,091 427	0,003	191 794,576	0,4	R(15)
1 563,616 236	0,003	191 730,203	0,4	R(14)
1 564,167 627	0,003	191 662,615	0,4	R(13)
1 564,745 620	0,003	191 591,818	0,4	R(12)
1 565,350 239	0,003	191 517,815	0,4	R(11)
1 565,981 507	0,003	191 440,612	0,4	R(10)
1 566,639 453	0,003	191 360,212	0,4	R(9)
1 567,324 108	0,003	191 276,620	0,4	R(8)
1 568,035 506	0,003	191 189,840	0,4	R(7)
1 568,773 681	0,003	191 099,877	0,4	R(6)
1 569,538 673	0,003	191 006,735	0,4	R(5)
1 570,330 523	0,003	190 910,419	0,4	R(4)
1 571,149 275	0,003	190 810,932	0,4	R(3)
1 571,994 976	0,003	190 708,280	0,4	R(2)
1 572,867 675	0,003	190 602,466	0,4	R(1)
1 573,767 423	0,003	190 493,496	0,4	R(0)

E.5 Excited state transitions

In an optogalvanic transition, the discharge voltage will vary proportionally with the optical intensity as the laser is tuned through the transition frequency. Table E.6 shows the wavelength of reported transitions covering the wavelength range 1 240 nm - 1 600 nm [30], [31]. The transitions for which Doppler-free (saturated) frequency measurements have been made are shown in bold [32], [33].

Table E.6 – Excited state optogalvanic transitions

Element	Wavelength nm	Uncertainty pm	Element	Wavelength nm	Uncertainty pm
Ar	1 249,111	2	Kr	1 501,914	2
Ar	1 270,581	2	Ar	1 505,064	2
Ar	1 273,696	2	Ar	1 517,694	2
Ar	1 274,977	2	Kr	1 521,376	2
Ar	1 280,629	2	Ne	1 523,448 8	2
Kr	1 286,541	2	Kr	1 524,380	2
Ne	1 291,555	2	Kr	1 533,065	2
Ar	1 293,675	2	Ar	1 533,350	2
Ar	1 296,025	2	Kr	1 533,915	2
Kr	1 298,886	2	Kr	1 537,625	2
Ar	1 301,118	2	Kr	1 543,795	2
Kr	1 318,104	2	Kr	1 547,825 99	0,20
Kr	1 473,841	2	Kr	1 563,978	2
Kr	1 476,666	2	Kr	1 568,530 81	0,36
Kr	1 476,954	2	Kr	1 582,441 37	0,36
Kr	1 496,597	2	Ar	1 599,385 78	0,36
Kr	1 500,943	2			

NOTE Values shown in bold can be saturated.

Annex F (informative)

Reference locked laser example

F.1 General

There are many ways to lock a tunable laser to a natural reference. This annex outlines two systems and a diagnostic approach if difficulties are encountered.

F.2 Laser sources

The main single frequency laser sources are distributed feedback lasers (DFB), external cavity (EC) lasers, fibre Bragg reflector lasers (FB) and single-mode fibre lasers (SMF).

DFB lasers have broadband modulation characteristics and can be tuned by varying the laser current and temperature. The tuning characteristics will depend on the laser design; typical values are 10 GHz/°C (0,1 nm/°C) and 750 MHz/mA (0,01 nm/mA). Modulation of the laser current gives rise to correlated frequency and amplitude modulation.

Because of the broad bandwidth it is important to ensure that a low noise laser current supply is used.

Typically, a DFB laser can be thermally tuned over 1 nm to 2 nm and will have a linewidth in the 0,1 MHz to 10 MHz range.

The modulation characteristics of EC lasers are determined by the mechanical design. Typically, the achievable modulation frequencies are < 500 Hz. Typically, an EC laser can be tuned over 100 nm and will have a linewidth of 50 kHz.

Because these EC lasers are mechanically tuned, they are vibration sensitive.

A typical SMF laser will have a linewidth of a few kHz or less.

F.3 Gas cell example

The length of the optical path in the gas will depend on the absorption strength of the line and the gas pressure. Compact, packaged reference gas cells for many of the gases listed in Annex E are commercially available. For weakly absorbing gases, such as carbon monoxide, multi-path absorption cells can be used. A typical measurement layout that includes lock-quality monitoring is shown in Figure F.1.

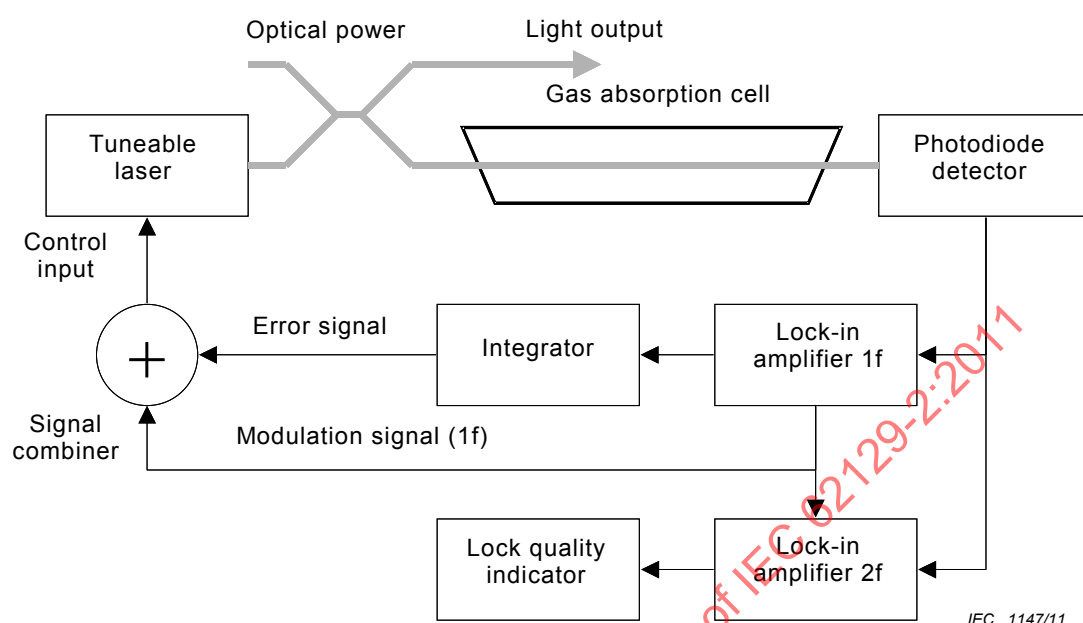


Figure F.1 – Typical measurement arrangement to lock laser to gas absorption line

Annex G (informative)

Balance between accuracy and calibration time

G.1 General

This annex provides additional supporting guidance, in addition to the information provided in 4.3, designed to help the user of this standard choose the appropriate systems to realise different calibration accuracies.

G.2 Reference sources

Different natural reference sources will affect the achievable calibration accuracy. Reference sources with a higher natural accuracy can be used to provide lower accuracy calibrations and so the choice of optical reference must be fit for purpose.

Commercial reference source implementations offer considerable convenience and will have specified uncertainties. An example of this would be a sub-system containing a diode laser and power supply and control electronics, locked to a linear absorption in an acetylene or similar reference material. These instruments can be calibrated against higher accuracy reference sources.

Typically, the accuracy that can be achieved for a good implementation of a laser locked to a low-pressure absorption feature is in the range between 1 % and 10 % of the Doppler broadened linewidth. An acetylene absorption line would have a linewidth of about 450 MHz, so the achievable accuracy of a locked reference would be in the range ± 5 MHz to ± 50 MHz (± 40 fm to ± 400 fm).

As stated in Annex E, the line-centre and linewidth will vary with gas pressure. This contributes to the limiting uncertainty achievable.

G.3 Instrument resolution

Wavelength meter designs based on the Michelson interferometer count the number of interference fringes for the unknown and internal reference wavelengths. A correction is applied to compensate for the refractive index of the air. Depending on the instrument design, some degree of fringe sub-division will be used to enhance the instrument resolution. The resolution will ultimately be set by the size of the number counted.

G.3.1 Optional measurements

The use of manufacturer-supplied values for the optional parameters allows a decision to be taken to trade calibration effort against accuracy of the results. Calibrations that use the manufacturer-supplied values are likely to have a lower accuracy but the calibration can be completed more quickly.

G.3.2 Summary of choices

A range of typical choices are presented in Table G.1 to achieve different calibration accuracies.

Table G.1 – Summary of choices

Fractional uncertainty	Reference	Measurement requirements
10^{-9}	Saturated reference standard	Very difficult to obtain this uncertainty using a wavelength meter. Consult manufacturer about system limitations. Refractive index models may become inaccurate. Consider using other instrumentation such as direct frequency measurement
10^{-8}	Saturated reference standard or very careful implementation of unsaturated, locked transition of known pressure, isotope material.	Refractive index corrections include humidity and CO ₂ concentration
10^{-7}	Unsaturated locked transition (molecular or excited state)	Simpler refractive index corrections can be used. Some manufacturers' parameters can be used
10^{-6}	Unstabilized gas lasers	Simple measurements, use optional manufacturers' parameters to reduce time

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Bibliography

- [1] F.E. Grubbs, "Sample criteria for testing outlying observations", *Ann. Math. Statist.* 21, pp. 27-58 (1950)
- [2] F.E. Grubbs, "Procedures for detecting outlying observations in samples", *Technometrics* 11, pp. 1-21 (1969)
- [3] F.E. Grubbs and G. Beck, "Extension of sample size and percentage points for significance tests of outlying observations", *Technometrics* 14, pp. 847-854 (1972)
- [4] K.D. Mielenz, K.F. Nefflen, W.R.C. Rowley, D.C. Wilson, and E. Engelhard, "Reproducibility of Helium-Neon Laser Wavelengths at 633 nm", *Applied Optics* 7, pp. 289-293 (1968)
- [5] E.A. Ballik, "Gain Method for the measurement of isotope shift", *Canadian Journal of Physics* 50, pp. 47-51, 1972; R.H. Cordover, T.S. Jaseja, A. Javan: *Appl. Phys. Lett.* 7, 322 (1965)
- [6] C. Pollock, D. Jennings, F. Petersen, J. Wells, R. Drullinger, E. Beaty, and K. Evenson, "Direct frequency measurements of transitions at 520 THz (576 nm) in iodine and 260 THz (1.15 μm) in neon", *Opt. Lett.* 8, pp. 133-135 (1983)
- [7] A. Szöke and A. Javan, "Isotope Shift and Saturation Behavior of the 1.15- μm Transition of Ne", *Phys. Rev. Lett.* 10, pp. 521-524 (1963)
- [8] H. Sasada and O. Kubota, "Frequency of Lamb-dip-stabilized 1.5 μm He-Ne lasers", *Appl. Phys. B* 55, pp. 186-188 (1992)
- [9] S.L. Gilbert, T.J. Drapela, and D.L. Franzen, "Moderate-accuracy wavelength standards for optical communication", in *Technical Digest Symposium on Optical Fiber Measurements 1992*, G.W. Day and D.L. Franzen, eds. NIST Spec. Publ. 839, 191-194 (1992)
- [10] M. Maleki and J.C. Petersen, "Wavelength calibration of a fiber-optical spectrum analyzers", in *Conference Digest. 3rd Optical Fibre Measurement Conference OFMC '95*, Paper [IV.2] (1995)
- [11] M. Maleki and J.C. Petersen, "Wavelength calibration of a fiber-optical spectrum analyzer: temperature dependence", *Appl. Opt.* 36, 4451-4455 (1997)
- [12] W.C. Swann and S.L. Gilbert, "Pressure-induced shift and broadening of 1510-1540- nm acetylene wavelength calibration lines", *J. Opt. Soc. Am. B* 17, 1263-1270 (2000)
- [13] K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji, and M. Kourogi, "Accurate optical frequency atlas of the 1.5- μm bands of acetylene", *J. Opt. Soc. Am. B* 13, 2708-2714 (1996)
- [14] C.S. Edwards, H.S. Margolis, G.P. Barwood, S.N. Lea, P. Gill and W.R.C. Rowley, "High-accuracy frequency atlas of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ in the 1.5 μm region", *Appl. Phys. B* 80, pp. 977-983 (2005)
- [15] C.S. Edwards, G.P. Barwood, H.S. Margolis, P. Gill and W.R.C. Rowley, "High-precision frequency measurements of the $\nu_1 + \nu_3$ combination band of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ in the 1.5 μm region", *J. Mol. Spectrosc.* 234, pp. 143-148 (2005)

- [16] A.A. Madej, J.E. Bernard, A.J. Alcock, A. Czajkowski and S. Chepurov, "Accurate absolute frequencies of the $\nu_1 + \nu_3$ band of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ using an infrared mode-locked Cr:YAG laser frequency comb", *J. Opt. Soc. Am. B* 23, pp. 741-749 (2006)
- [17] A.A. Madej, A.J. Alcock, A. Czajkowski, J.E. Bernard and S. Chepurov, "Accurate absolute reference frequencies from 1511 to 1545 nm of the $\nu_1 + \nu_3$ band of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ determined with laser frequency comb interval measurements", *J. Opt. Soc. Am. B* 23, pp. 2200-2208 (2006)
- [18] http://www.bipm.org/utis/common/pdf/mep/M-e-P_C2H2_1.54.pdf
- [19] M. Kusaba and J. Henningsen, "The $\nu_1+\nu_3$ and the $\nu_1+\nu_2+\nu_4^1+\nu_5^{-1}$ combination bands of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$. Line strengths, broadening parameters and pressure shifts", *J. Mol. Spectrosc.* 209, 216-227 (2001)
- [20] J. Henningsen and J.C. Petersen, "Reference wavelength standards for optical communication: extended C-band coverage with $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ", in *Conference Digest. 6th Optical Fibre Measurement Conference OFMC '01*, pp. 183-187 (2001). ISBN 0 946754 40 3
- [21] W.C. Swann and S.L. Gilbert, "Line centers, pressure shift, and pressure broadening of 1530-1560 nm hydrogen cyanide wavelength calibration lines", *J. Opt. Soc. Am. B* 22, 1749-1756 (2005)
- [22] S.L. Gilbert, W.C. Swann, and C.M. Wang, "Hydrogen Cyanide H $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ Absorption Reference for 1530-1560 nm Wavelength Calibration – SRM2519", *NIST Spec. Publ.* 260-137 (1998)
- [23] W.C. Swann and S.L. Gilbert, "Line centers, pressure shift, and pressure broadening of 1530–1560 nm hydrogen cyanide wavelength calibration lines", *J. Opt. Soc. Am. B* 22, 1749-1756 (2005)
- [24] CRC Handbook of Chemistry and Physics, 79th edition (1998), pages 10-236 to 10-240
- [25] DJE Knight, KI Pharaoh and DA Humphreys, "Absolute frequency measurement of the 3.0 R(21) transition of CO at 1.5605 μm for optical communication standards", *Proc.EFTF 95, Besancon, March 8-10 1995*
- [26] J. Henningsen, H. Simonsen, T. Møgelberg, and E. Trudsø, "The 0 $\rightarrow$ 3 Overtone band of CO: Precise Linestrengths and Broadening Parameters", *J. Mol. Spectrosc.* 193, 354-362 (1999)
- [27] W.C. Swann and S.L. Gilbert, "Pressure-Induced Shift and Broadening of 1560–1630 nm Carbon Monoxide Wavelength-calibration Lines", *J. Opt. Soc. Am. B*, 19 (10), 2461-2467 (2002)
- [28] W.C. Swann and S.L. Gilbert, "Wavelength Calibration Standards for the WDM L-Band", in *Conference Digest. 6th Optical Fibre Measurement Conference OFMC '01*, pp. 175-178 (2001). ISBN 0 946754 40 3
- [29] C. Chackerian Jr., R. Freedman, L.P. Giver, and L.R. Brown, "Absolute rovibrational intensities, self-broadening and self-shift coefficients for the $X^1\Sigma^+=3 \leftarrow V=0$ band of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ ", *J. Mol. Spectrosc.* 210, pp. 119-126 (2001)
- [30] AJ Lucero, YC Chung and RW Tkach, "Survey of optical transitions for absolute frequency locking for lightwave systems", *IEEE Photonics Tech. Letts.* 3, pp. 484-486 (1991)

- [31] UP Fischer and C von Helmolt, "Absorption spectra of excited Kr 84 states between 1.5 and 1.58 μm and their use for absolute frequency locking", *J. of Lightwave Tech.* 14, pp. 139-143 (1996)
 - [32] DA Humphreys, "Saturated Optogalvanic transition in Krypton at 1564 nm", pp 25-28, SOFM 2000
 - [33] DA Humphreys and C Campbell, "Preliminary results of L-band excited-state optical frequency reference survey", Digest of OFMC '01
 - [34] IEC 60050-731 [IEV 731] (1991), *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 731: Optical fibre communication*
 - [35] IEC 60793-1-1, *Optical fibres – Part 1-1: Measurement methods and test procedures – General and guidance*
 - [36] IEC 60825-1, *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements*
 - [37] IEC 60825-2, *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*
 - [38] IEC 61300-3-2, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-2: Examination and measurements – Polarization dependent loss in a single-mode fibre optic device*
 - [39] IEC/TR 61930, *Fibre optic graphical symbology*
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	52
INTRODUCTION	54
1 Domaine d'application	55
2 Références normatives	55
3 Termes et définitions	55
4 Préparation pour l'étalonnage	59
4.1 Organisme	59
4.2 Traçabilité	59
4.3 Conseils pour les mesures et les étalonnages	60
4.4 Recommandations aux clients	60
5 Étalonnage de longueur d'onde unique	60
5.1 Généralités	60
5.2 Détermination des conditions d'étalonnage	61
5.3 Mode opératoire d'étalonnage	62
5.3.1 Généralités	62
5.3.2 Configuration de mesure	62
5.3.3 Mode opératoire détaillé	63
5.3.4 Essai de stabilité (si nécessaire)	64
5.3.5 Mesure de « répétabilité marche/arrêt » (facultative si une spécification est disponible)	65
5.3.6 Mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde (facultative)	67
5.3.7 Mesure de répétabilité du connecteur (facultative)	68
5.4 Incertitude d'étalonnage	69
5.5 Rapport des résultats	70
6 Étalonnage de puissance absolue	70
Annexe A (normative) Fondements mathématiques	71
Annexe B (informative) Rejet des aberrations	74
Annexe C (informative) Exemple d'étalonnage d'un appareil de mesure de longueur d'onde unique	76
Annexe D (informative) Bandes de longueurs d'onde UIT (Union Internationale des Télécommunications)	79
Annexe E (informative) Transitions de références atomiques et moléculaires	80
Annexe F (informative) Exemple de laser verrouillé de référence	92
Annexe G (informative) Équilibre entre la précision et le temps d'étalonnage	94
Bibliographie	96
Figure 1 – Exemple de chaîne de traçabilité	59
Figure 2 – Mesure de la longueur d'onde utilisant un signal de surveillance de la qualité du verrouillage	62
Figure 3 – Mesure de la longueur d'onde utilisant un appareil de mesure de longueur d'onde de référence	63
Figure F.1 – Agencement de mesure type pour verrouiller un laser sur une raie d'absorption de gaz	93
Tableau 1 – Paramètres types pour calculer la durée de mesure de « répétabilité marche/arrêt »	66

Tableau B.1 – Valeurs critique Z_c en fonction de la taille de l'échantillon N	75
Tableau C.1 – Contributions d'incertitude de Type A pour une mesure de stabilité	76
Tableau C.2 – Contributions pour une mesure de « répétabilité marche/arrêt »	77
Tableau C.3 – Bilan d'incertitude pour la dépendance par rapport à la longueur d'onde	77
Tableau C.4 – Bilan d'incertitude pour l'étalonnage de l'appareil de mesure de longueur d'onde.....	78
Tableau D.1 – Bandes UIT-T (Union Internationale des Télécommunications-T) dans différentes unités	79
Tableau E.1 – Raies laser hélium-néon	82
Tableau E.2 – Longueurs d'onde centrales dans le vide pour l'acétylène $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$	83
Tableau E.3 – Valeurs de fréquence et de longueur d'onde dans le vide pour les bandes $\nu_1 + \nu_3$ et $\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$ de $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$	85
Tableau E.4 – Liste des transitions H^{13}CN	88
Tableau E.5 – Liste des transitions $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	90
Tableau E.6 – Transitions optogalvaniques d'état excité	91
Tableau G.1 – Récapitulatif des choix	95

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE DE LONGUEUR D'ONDE/APPAREIL DE MESURE DE LA FRÉQUENCE OPTIQUE –

Partie 2: Appareils de mesure de longueur d'onde unique à interféromètre de Michelson

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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62129-2 a été établie par le comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86/395/FDIS	86/399/RVD

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

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

La liste de toutes les parties de la série 62129, publiées sous le titre général, *Etalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/Appareils de mesure de la fréquence optique*, est disponible 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 stabilité 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.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

INTRODUCTION

Les appareils de mesure de longueur d'onde, souvent basés sur l'interféromètre de Michelson, sont conçus pour mesurer aussi précisément que possible la longueur d'onde d'une source optique. Bien que les appareils de mesure de longueur d'onde contiennent une référence interne absolue, généralement un laser hélium-néon, un étalonnage est nécessaire pour obtenir les meilleures précisions possibles. L'instrument est généralement utilisé pour mesurer des longueurs d'onde différentes de celle de la référence interne. Des corrections de l'indice de réfraction de l'air environnant sont effectuées dans l'instrument. Il faut donc qu'une description précise des conditions d'étalonnage fasse partie de l'étalonnage.

La présente Norme internationale définit toutes les étapes du processus d'étalonnage: détermination des conditions d'étalonnage, exécution de l'étalonnage, calcul de l'incertitude et rapport de l'incertitude, des conditions de l'étalonnage et de la traçabilité.

La procédure d'étalonnage décrit la façon de déterminer le rapport entre la valeur de la longueur d'onde (ou la fréquence optique) de référence d'entrée et le résultat donné par l'appareil de mesure de longueur d'onde. Ce rapport est appelé *facteur de correction*. L'incertitude de mesure du facteur de correction est combinée selon l'Annexe A d'après les contributions d'incertitude de l'appareil de mesure de référence, l'appareil de mesure d'essai, la mise en place et la procédure.

Les calculs passent par la caractérisation détaillée de chacune des incertitudes. Il est important de savoir que:

- a) les estimations de chacune des incertitudes sont acceptables;
- b) une analyse d'incertitude détaillée n'est nécessaire qu'une seule fois pour chaque type d'appareil de mesure de longueur d'onde soumis à essai et tous les étalonnages suivants peuvent être fondés sur cette unique analyse;
- c) certaines des incertitudes individuelles peuvent simplement être considérées comme faisant partie d'une liste de contrôle avec une valeur réelle pouvant être négligée.

Un certain nombre de références de fréquence optique peuvent être utilisées pour fournir une fréquence optique traçable. Celles-ci sont basées sur l'absorption par des molécules de gaz à basse pression et utilisant des transitions opto-galvaniques dans des atomes à l'état excité. L'Annexe E énumère les raies.

ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE DE LONGUEUR D'ONDE/APPAREIL DE MESURE DE LA FRÉQUENCE OPTIQUE –

Partie 2: Appareils de mesure de longueur d'onde unique à interféromètre de Michelson

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62129 est applicable aux instruments mesurant la longueur d'onde ou la fréquence optique dans le vide émise par des sources types de l'industrie des communications par fibres optiques. Ces sources comportent des diodes laser DFB (à rétroaction répartie, *Distributed Feedback*), des lasers à cavité externe et des sources du type à fibres unimodales longitudinales. L'hypothèse est faite que le rayonnement optique sera couplé à l'appareil de mesure de longueur d'onde par une fibre optique unimodale. La présente norme décrit l'étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde destiné à être effectué par des laboratoires d'étalonnage ou par des fabricants d'appareils de mesure de longueur d'onde. La présente norme fait partie de la série CEI 62129 relative à l'étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/appareils de mesure de fréquence optique. Se référer à la CEI 62129 pour l'étalonnage des analyseurs de spectre optique.

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 60050-300:2001, *Vocabulaire Electrotechnique International – Mesures et appareils de mesure électriques et électroniques* – Partie 311: Termes généraux concernant les mesures – Partie 312: Termes généraux concernant les mesures électriques – Partie 313: Types d'appareils électriques de mesure – Partie 314: Termes spécifiques selon le type d'appareil

CEI 61315 : 2005, *Etalonnage de wattmètres pour dispositifs à fibres optiques*

CEI/TR 61931 :1998, *Fibres optiques – Terminologie*

ISO/CEI 17025:2005, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

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

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

3 Termes et définitions

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

3.1

laboratoire d'étalonnage agréé

laboratoire d'étalonnage autorisé par le laboratoire national de normalisation approprié à émettre des certificats d'étalonnage avec une incertitude minimale spécifiée qui démontrent la traçabilité à des *étalons nationaux*

3.2

réglage

ensemble des opérations exécutées sur un instrument pour qu'il fournisse des indications données correspondant à des valeurs données du mesurande

[CEI 60050-300:2001 (311-03-16); voir aussi ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11, modifiée]

3.3

étalonnage

ensemble des opérations qui établissent, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de quantités indiquées par un instrument de mesure et les valeurs correspondantes réalisées par des étalons

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39, modifiée]

NOTE 1 Le résultat d'un étalonnage permet, soit l'affectation de valeurs de mesurandes aux indications, soit la détermination de corrections par rapport aux indications.

NOTE 2 Un étalonnage peut également déterminer d'autres propriétés métrologiques telles que l'effet des grandeurs d'influence.

NOTE 3 Le résultat d'un étalonnage peut être enregistré dans un document appelé parfois certificat d'étalonnage ou rapport d'étalonnage.

3.4

conditions d'étalonnage

conditions des mesures dans lesquelles l'étalonnage est effectué

3.5

facteur de correction

CF (correction factor)

facteur numérique par lequel est multiplié le résultat non corrigé d'une mesure pour compenser l'erreur systématique

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.53, modifiée]

3.6

détecteur

élément de l'appareil de mesure de longueur d'onde qui transforme la puissance optique rayonnée en une quantité mesurable, habituellement électrique

[CEI/TR 61931 et ISO/IEC Guide 99:2007, 3.9, modifiée]

3.7

écart

valeur moins sa valeur de référence

NOTE Dans la présente norme, l'écart est la différence entre l'indication de l'appareil de mesure d'essai et l'indication de l'appareil de mesure de référence lorsqu'ils sont excités dans les mêmes conditions.

3.8

excitation (fibre-)

description de la distribution de puissance optique entre les modes dans la fibre

NOTE On suppose que les fibres unimodales sont généralement excitées par un seul mode (mode fondamental)

3.9**état de l'appareil**

description complète de l'état de l'appareil de mesure durant l'étalonnage

3.10**plage de mesure**

ensemble de valeurs de mesurandes pour lesquelles on souhaite que l'erreur d'un instrument de mesure se trouve entre des limites spécifiées

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.7, modifiée]

NOTE Dans la présente norme, la plage de mesure est la plage de puissance rayonnée (partie de la *plage d'utilisation*), pour laquelle l'incertitude des conditions de fonctionnement est spécifiée. Dans ce contexte, il convient d'éviter le terme « plage dynamique ».

3.11**étalon national (de mesure)**

étalon reconnu par une décision nationale pour servir de base, dans un pays, à la fixation des valeurs de tous les autres étalons de la grandeur donnée

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.3, modifiée]

3.12**laboratoire national de métrologie**

laboratoire qui conserve l'*étalon national*

3.13**étalon naturel**

transition atomique ou moléculaire pouvant être utilisée pour réaliser un étalon de référence

3.14**conditions de fonctionnement**

ensemble approprié de plages de valeurs spécifiées de grandeurs d'influence habituellement plus larges que les conditions de référence pour lesquelles les incertitudes d'un instrument de mesure sont spécifiées

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.9, modifiée]

NOTE Les conditions de fonctionnement et l'incertitude des conditions de fonctionnement sont habituellement spécifiées par le fabricant pour la commodité de l'utilisateur.

3.15**plage de fonctionnement**

plage de valeurs spécifiée d'une condition d'un ensemble de *conditions de fonctionnement*

3.16**port d'entrée optique**

entrée physique de l'appareil de mesure de longueur d'onde (ou de l'étalon) auquel la puissance de rayonnement doit être appliquée ou auquel l'extrémité de la fibre optique doit être connectée. On suppose qu'un trajet optique (trajet de rayons avec ou sans éléments optiques tels que des lentilles, diaphragmes, guides de lumière, etc.) est relié au port d'entrée optique avec le détecteur

3.17**conditions de référence**

conditions d'utilisation prescrites pour effectuer l'essai de la performance d'un instrument de mesure ou pour comparaison interlaboratoire de résultats de mesure

[ISO/IEC Guide 99:2007, 4.11, modifiée]

NOTE Les conditions de référence comportent généralement des valeurs de référence ou des plages de référence pour les grandeurs d'influence affectant l'instrument de mesure.

3.18

appareil de mesure de longueur d'onde de référence

étalon utilisé comme référence pour étalonner un appareil de mesure de longueur d'onde d'essai

3.19

source de référence

laser stabilisé par référence à une transition atomique ou moléculaire ou un peigne de fréquences stabilisé de fréquence/longueur d'onde connue

3.20

étalon de référence

étalon, ayant généralement la qualité métrologique la plus haute disponible à un emplacement donné ou dans un organisme donné, d'après lequel sont déterminées les mesures effectuées à cet endroit

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.6, modifiée]

3.21

appareil de mesure d'essai

appareil de mesure de longueur d'onde (ou étalon) destiné à être étalonné par comparaison avec l'*appareil de mesure de longueur d'onde de référence* ou l'*étalon de référence*

3.22

traçabilité

propriété du résultat d'une mesure ou de la valeur d'un étalon telle qu'elle peut être associée à des références déterminées, habituellement des étalons nationaux ou internationaux, par une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41, modifiée]

3.23

chaîne de traçabilité

chaîne de comparaison continue (voir la Figure 1)

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41 et 2.42, modifiée]

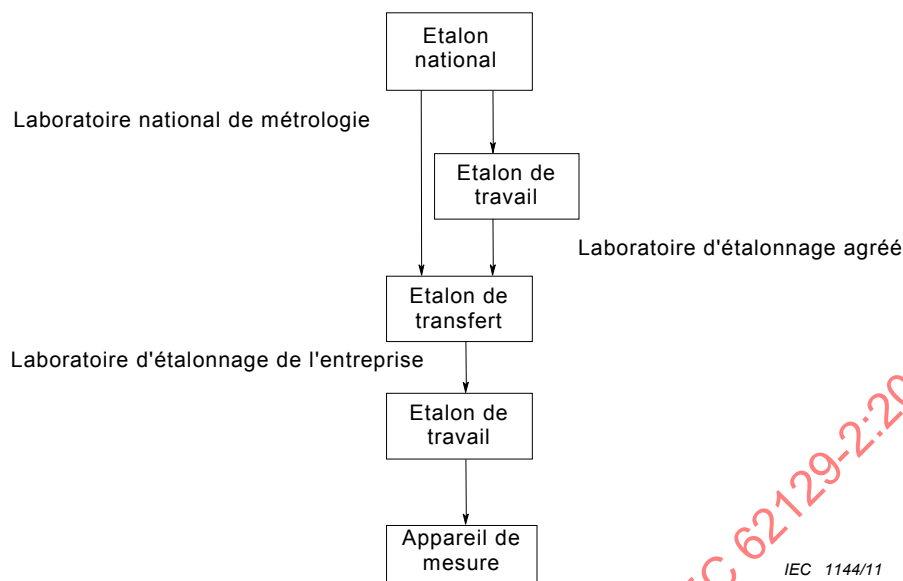


Figure 1 – Exemple de chaîne de traçabilité

3.24

appareil de mesure de longueur d'onde (unique à interféromètre de Michelson)

instrument basé sur un interféromètre de Michelson capable de mesurer la longueur d'onde d'une source

NOTE Certaines conceptions d'instruments peuvent également mesurer la puissance d'entrée, mais avec une plus grande incertitude que la plupart des appareils de mesure de puissance.

3.25

étalon de travail

étalon utilisé par routine pour étalonner des instruments de mesure

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.7, modifiée]

NOTE Un étalon de travail est habituellement étalonné avec un étalon de référence.

4 Préparation pour l'étalonnage

4.1 Organisme

Il convient que le laboratoire d'étalonnage satisfasse aux exigences de l'ISO/CEI 17025.

Une procédure de mesure documentée doit exister pour chaque type d'étalonnage effectué, indiquant des instructions d'utilisation pas à pas ainsi que le matériel à utiliser.

4.2 Traçabilité

Il convient de satisfaire aux exigences de l'ISO/CEI 17025.

Tous les étalons utilisés dans le processus d'étalonnage doivent être étalonnés conformément à un programme documenté avec *traçabilité* par rapport aux *laboratoires nationaux de métrologie* ou à des *laboratoires d'étalonnage agréés*. Il est conseillé de conserver plusieurs étalons à chaque niveau hiérarchique de façon à pouvoir vérifier la performance de l'étalon par des comparaisons au même niveau. S'assurer que tout autre équipement d'essai ayant une

influence significative sur les résultats de l'étalonnage est étalonné. Sur demande, spécifier cet équipement d'essai et sa ou ses *chaînes de traçabilité*. La ou les périodes de réétalonnage doivent être définies et documentées.

4.3 Conseils pour les mesures et les étalonnages

Ce paragraphe fournit des conseils généraux pour toutes les mesures et étalonnages des appareils de mesure de longueur d'onde.

Il convient d'effectuer l'étalonnage dans un environnement dont la température est régulée. La température recommandée est de 23 °C. En fonction de l'incertitude désirée, il peut être nécessaire de surveiller la température, la pression atmosphérique et l'humidité durant la mesure, car l'indice de réfraction de l'air est fonction de ces paramètres. Une régulation d'humidité peut s'avérer nécessaire pour garantir que l'environnement satisfait la spécification d'exploitation de l'instrument.

Il convient de maintenir le laboratoire propre. Avant toute mesure, il convient de toujours nettoyer les connecteurs et les ports d'entrée optique. Il convient de contrôler la qualité et la propreté du connecteur situé devant l'appareil de mesure de longueur d'onde. L'appareil de mesure de longueur d'onde est un instrument mécanique de précision et il convient donc de déplacer la fibre vers l'instrument plutôt que l'inverse, comme cela est requis pour les étalonnages d'appareils de mesure de puissance.

Les diodes laser sont sensibles aux réflexions arrière. Pour améliorer la stabilité, il est conseillé d'utiliser un isolateur optique entre la diode laser et l'appareil de mesure d'essai.

Pour les instruments qui indiquent également la puissance optique, se référer à la CEI 61315 pour les procédures d'étalonnage. Il est important de noter que les sources optiques telles que les diodes laser à cavités étendues peuvent avoir une largeur de raie étroite (par exemple, 50 kHz) et en conséquence donnent naissance à une grande longueur de cohérence. Des réflexions cohérentes s'ajoutent en tant que somme vectorielle des champs électriques plutôt que somme des puissances optiques.

L'utilisation d'une source de référence basée sur un étalon naturel procure des incertitudes plus faibles que les étalonnages réalisés en utilisant un appareil de mesure de longueur d'onde de référence.

4.4 Recommandations aux clients

On s'attend à ce que l'étalonnage d'un appareil de mesure de longueur d'onde unique dans une bande UIT (Union internationale des télécommunications) (voir Annexe D) suffise pour cette bande. L'augmentation des incertitudes dues à l'extrapolation de l'étalonnage à des bandes adjacentes doit être déterminée pour la conception de chaque instrument.

5 Etalonnage de longueur d'onde unique

5.1 Généralités

L'étalonnage en longueur d'onde de l'appareil de mesure de longueur d'onde est basé sur une comparaison avec un étalon de référence et l'incertitude comprend la contribution de la stabilité de l'instrument soumis à l'essai, sa « répétabilité marche/arrêt », sa dépendance par rapport à la longueur d'onde et la répétabilité du connecteur optique.

La correction est basée sur le résultat de l'étalonnage.

La mesure de « répétabilité marche/arrêt » fournit une contribution au calcul d'incertitude de l'instrument. La répétabilité de la stabilisation de la référence de longueur d'onde interne et la stabilité de l'alignement optique constituent les principales contributions à l'incertitude.

La mesure de la dépendance par rapport à la longueur d'onde fournit également une contribution au calcul d'incertitude de l'instrument. Cette mesure a plusieurs buts.

- a) Vérifier que la correction de l'indice de réfraction de l'air a été convenablement mise en œuvre dans l'instrument.
- b) Déterminer les contributions à l'incertitude provoquées par les erreurs de troncature numérique.
- c) Déterminer les contributions à l'incertitude provoquées par la longueur finie du trajet optique dans l'instrument d'essai.
- d) Déterminer les effets d'alignement systématique tels que l'orientation du faisceau en fonction de la longueur d'onde.

L'étalonnage peut être effectué soit en utilisant une source de référence avec un moniteur de qualité de verrouillage, soit en utilisant un appareil de mesure de longueur d'onde de référence.

L'acquisition des résultats de mesure sous contrôle d'un ordinateur est fortement recommandée.

5.2 Détermination des conditions d'étalonnage

La détermination et le maintien des conditions d'étalonnage constituent une partie importante de l'étalonnage, car toute variation de ces conditions est capable de produire des résultats de mesures erronés. Il convient que les conditions d'étalonnage soient une approximation proche des conditions d'utilisation prévues. Ceci garantit que l'incertitude (supplémentaire) dans l'environnement de fonctionnement est aussi faible que possible. Il convient de spécifier les conditions d'étalonnage sous forme de valeurs nominales avec des incertitudes, le cas échéant. Afin de satisfaire aux exigences de la présente norme, les conditions d'étalonnage doivent comporter au moins

- a) la date de l'étalonnage,
- b) la température ambiante avec l'incertitude, par exemple, $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Il peut être nécessaire de surveiller la température en continu pour s'assurer qu'elle reste comprise entre les limites prescrites,
- c) la pression atmosphérique, par exemple 1020 hPa à 1025 hPa. Il peut être nécessaire de surveiller la pression atmosphérique en continu pour s'assurer qu'elle reste comprise entre les limites prescrites,
- d) l'humidité relative ambiante, par exemple 30 % à 50 %. Il peut être nécessaire de surveiller l'humidité relative ambiante en continu pour s'assurer qu'elle reste comprise entre les limites prescrites. On suppose par défaut une humidité relative inférieure au point de condensation,
- e) la puissance optique d'entrée (devant se trouver dans la spécification admissible pour les instruments),
- f) le connecteur et le type de polissage,
- g) des détails concernant le matériau de référence ou son numéro d'identification. Des exemples ont été pris pour une cellule d'absorption à gaz:
 - 1) gaz et isotope, par exemple $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$
 - 2) longueur du trajet, par exemple 15 cm
 - 3) pression à l'intérieur du récipient, par exemple 1 000 Pa
 - 4) transition, par exemple R(21),
- h) la longueur d'onde ou la fréquence centrale dans le vide de la source d'excitation avec son incertitude,
- i) si une source de transition verrouillée est utilisée, la qualité du verrouillage doit alors être surveillée en continu durant les mesures; un indicateur de verrouillage peut être suffisant.

NOTE Les conditions ci-dessus peuvent ne pas être exhaustives. Il peut exister d'autres paramètres ayant une influence significative sur l'incertitude de mesure et en conséquence il convient également de les rapporter.

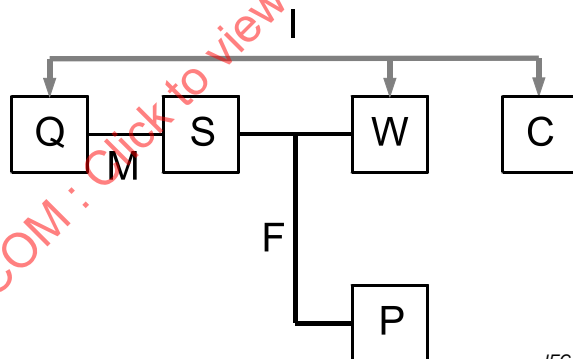
5.3 Mode opératoire d'étalonnage

5.3.1 Généralités

- Déterminer et enregistrer les conditions d'étalonnage appropriées (voir 5.2). Mettre tous les appareils sous tension et attendre une durée suffisante pour qu'ils se stabilisent.
- Mettre en service la source de référence.
- Dans certaines des conceptions d'instruments plus anciennes, une combinaison connecteur-adaptateur est utilisée pour coupler la lumière de la fibre optique dans l'instrument. Une fraction de la lumière du signal de référence, généralement un laser hélium-néon, est émise par l'instrument. Ce faisceau définit l'axe optique de l'interféromètre. La maximisation du signal de référence résiduel provenant de l'appareil de mesure de longueur d'onde d'essai optimise l'alignement de l'ensemble connecteur-adaptateur. La puissance optique doit être mesurée en utilisant un appareil de mesure de puissance linéaire.
- Régler l'état d'instrument de l'appareil de mesure de longueur d'onde d'essai selon le manuel d'instructions. Sélectionner les unités appropriées.
- Enregistrer les états d'instrument de l'appareil de mesure de longueur d'onde.

5.3.2 Configuration de mesure

La Figure 2 représente la configuration utilisant une source de référence S avec un moniteur de qualité de verrouillage Q. Il peut être nécessaire de surveiller la température, la pression et l'humidité de l'environnement. La variation d'indice de réfraction due à l'humidité est inférieure à $\pm 4 \times 10^{-7}$ à 1 550 nm. La surveillance de l'humidité relative est facultative et elle n'est requise que pour obtenir la meilleure spécification.



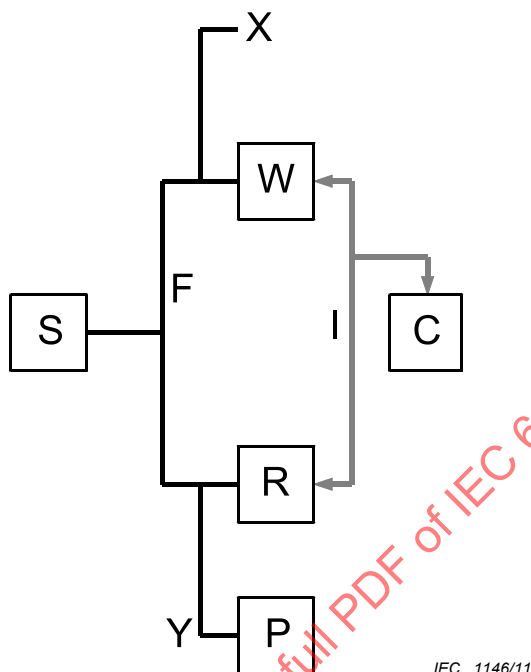
IEC 1145/11

Légende

- | | |
|---|--|
| C | ordinateur de contrôle |
| F | liaison par fibre optique |
| I | connexion de l'interface informatique |
| M | liaison au moniteur |
| P | mesure de la puissance de référence |
| Q | surveillance de la qualité du verrouillage |
| S | source de référence |
| W | mesure de la longueur d'onde d'essai |

Figure 2 – Mesure de la longueur d'onde utilisant un signal de surveillance de la qualité du verrouillage

En l'absence de signal indiquant la qualité du verrouillage provenant de la source, un appareil de mesure de longueur d'onde de référence doit être utilisé pour surveiller la qualité du verrouillage (Figure 3). Si le verrouillage est perdu, les résultats dérivent considérablement par rapport à l'état verrouillé. Il est important d'effectuer les mesures simultanément à la fois sur les appareils de mesure de longueur d'onde de référence et d'essai.



IEC 1146/11

Légende

C	ordinateur de contrôle
F	liaison par fibre optique
I	connexion de l'interface informatique
P	appareil de mesure de puissance de référence
R	appareil de mesure de la longueur d'onde de référence
S	source de référence
W	appareil de mesure de la longueur d'onde d'essai

NOTE L'appareil de mesure de puissance de référence peut être utilisé aux emplacements X et Y pour mesurer la puissance optique incidente sur les appareils de mesure de longueur d'onde d'essai ou de référence.

Figure 3 – Mesure de la longueur d'onde utilisant un appareil de mesure de longueur d'onde de référence

5.3.3 Mode opératoire détaillé

Le nombre de mesures moyennées par relevé influe sur la taille du fichier de résultats, le rejet de données par la routine de mesure et la détection d'un défaut de verrouillage. Un grand nombre d'échantillons par mesure augmentera la taille de l'ensemble de données utilisé pour contrôler la validité des points de données extrêmes. Si le nombre d'échantillons est trop grand, la résolution temporelle sera alors réduite. Une perte de verrouillage peut alors ne pas être détectée. On prend généralement 50 échantillons (n) par mesure. On peut appliquer la même méthodologie que celle utilisée en 5.3.5 pour déterminer la valeur optimale de n . Le rejet statistique des points éloignés (Annexe B) est fortement recommandé.

La procédure de mesure est la suivante.

- Laisser l'équipement atteindre l'équilibre.
- Configurer le logiciel d'acquisition de données.

- c) Vérifier que la source optique est verrouillée et qu'elle fonctionne correctement.
- d) Exécuter le logiciel d'acquisition de données.

Le facteur de correction est déterminé d'après le rapport des valeurs moyennes de chaque mesure:

$$CF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{ref_i}}{\lambda_{test_i}} = \frac{\overline{\lambda_{ref}}}{\overline{\lambda_{test}}} \quad (1)$$

où λ_{ref} est la longueur d'onde de référence et λ_{test} est la longueur d'onde mesurée par l'appareil de mesure de longueur d'onde d'essai. Il convient que l'incertitude associée au facteur de correction soit exprimée en une valeur sans dimension. Nous pouvons aussi déterminer l'écart D comme dans l'Equation (2). Il convient que l'incertitude associée avec l'écart soit exprimée comme une longueur.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_{test_i} - \lambda_{ref_i}) = \overline{\lambda_{test}} - \overline{\lambda_{ref}} \quad (2)$$

5.3.4 Essai de stabilité (si nécessaire)

On mesure la stabilité de l'instrument mesurant une longueur d'onde unique dans les conditions normales de fonctionnement afin de déterminer la dérive de l'instrument et sa contribution à l'incertitude. Il faut que la durée de la mesure dure plus d'une heure (12 heures sont conseillées). Le rejet statistique des points éloignés (Annexe B) est fortement recommandé.

Comme pour l'étalonnage, le nombre de mesures moyennées par relevé influe sur la taille du fichier de résultats, le rejet de données par le sous-programme de mesure et la détection d'un défaut de verrouillage. Un grand nombre d'échantillons par mesure augmentera la taille de l'ensemble de données utilisé pour contrôler la validité des points de données extrêmes. Si le nombre d'échantillons est trop grand, la résolution temporelle sera alors réduite. Une perte de verrouillage peut alors ne pas être détectée. On prend généralement 50 échantillons (n) par mesure. On peut appliquer la même méthodologie que celle utilisée en 5.3.5 pour déterminer la valeur optimale de n .

La procédure de mesure est la suivante :

- a) Laisser l'équipement atteindre l'équilibre.
- b) Configurer le logiciel d'acquisition de données.
- c) Vérifier que la source optique est verrouillée et qu'elle fonctionne correctement.
- d) Exécuter le logiciel d'acquisition de données.

Si l'essai de stabilité est effectué pendant l'étalonnage, il convient de calculer le facteur de correction en utilisant ces résultats. Si l'instrument n'est pas stable, l'étalonnage ne sera pas valide.

La longueur d'onde centrale moyenne pour les n mesures de chaque point de données de l'essai de stabilité est donnée par:

$$\lambda_{s_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{test_{i,j}} \quad (3)$$

où λ_{s_i} est la longueur d'onde moyenne pour la $i^{\text{ème}}$ mesure de stabilité ($i = 1 \dots N$) comprenant chacune des n mesures ($j = 1 \dots n$) et $\lambda_{test_{i,j}}$ est la valeur mesurée.

La contribution de l'incertitude-type de type A de chaque mesure de longueur d'onde centrale est donnée par l'Equation (4) (d'après l'Equation (A.3)).

$$ustest_i = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{stest_{i,j}} - \lambda_{s_i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

La contribution à l'incertitude due à la stabilité peut être calculée d'après l'Equation (5) et l'Equation (6).

$$\overline{\lambda_s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{s_i} \quad (5)$$

$$us = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{stest_i}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

où us est la contribution à l'incertitude de la mesure de stabilité et N est le nombre de points de données de mesures de stabilité. Il convient de choisir un nombre de mesures n suffisamment grand pour chaque point de données des mesures de stabilité pour que le second terme de l'Equation (6) devienne négligeable par rapport au premier terme, ce qui donne l'Equation (7).

$$us = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

5.3.5 Mesure de « répétabilité marche/arrêt » (facultative si une spécification est disponible)

5.3.5.1 Généralités

Les mesures utilisant une source de référence de longueur d'onde fixe peuvent être affectées par la « répétabilité marche/arrêt » de la référence interne de l'appareil de mesure de longueur d'onde. Cet essai est facultatif s'il a déjà été effectué lors de la qualification du produit. Cet essai peut être combiné avec la mesure de répétabilité de connecteur (5.3.7) pour simplifier le processus d'étalonnage global.

La durée de chaque mesure doit être suffisante pour que son incertitude de mesure n'augmente pas de manière significative l'incertitude du résultat. La contribution à l'incertitude déterminée d'après cette mesure comprend une composante due à la « répétabilité marche/arrêt » de la mesure et une composante due au bruit de mesure. Un moyennage est requis pour garantir que la composante dominante de la contribution à l'incertitude est due à la « répétabilité marche/arrêt » de l'instrument. Le nombre de moyennages dépendra du bruit de mesure et peut être calculé en utilisant l'Equation (8). Les paramètres types sont donnés dans le Tableau 1.

$$n = \frac{\sigma_{rms}^2}{\sigma_{target}^2} \quad (8)$$

où n est le nombre de moyennes pour chaque mesure, σ_{rms} et σ_{target} sont les contributions estimées du bruit en moyenne quadratique et cible. Le rejet statistique des points éloignés (Annexe B) est fortement recommandé.

Tableau 1 – Paramètres types pour calculer la durée de mesure de « répétabilité marche/arrêt »

Paramètre	Valeur
Bruit estimé en moyenne quadratique	1 pm
Contribution à l'incertitude cible	0,05 pm
Nombre de moyennes requises	400
Vitesse de mesure	1 s ⁻¹
Durée	7 min

5.3.5.2 Procédure de mesure

- Laisser l'équipement atteindre l'équilibre.
- Configurer le logiciel d'acquisition de données.
- Mettre l'appareil de mesure de longueur d'onde hors tension et vérifier que la source de référence est entièrement éteinte.
- Attendre au moins 10 min.
- Mettre l'appareil de mesure de longueur d'onde sous tension et attendre qu'il ait terminé son autocontrôle et la stabilisation de son laser de référence. Le temps mis par le système pour atteindre la stabilité maximale peut aller jusqu'à 1 à 2 h, voir les lignes directrices dans les instructions fournies par le fabricant.
- Mesurer la longueur d'onde en utilisant le logiciel d'acquisition de données pour effectuer l'acquisition de n mesures.
- Mettre l'appareil de mesure de longueur d'onde hors tension.
- Répéter à partir de c) jusqu'à avoir effectué au moins N ensembles de mesures.
- La mesure de « répétabilité marche/arrêt » est terminée.

La longueur d'onde centrale moyenne pour les n mesures de chaque cycle de l'essai de « répétabilité marchent/arrêt » est donnée par:

$$\lambda_{rep_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{test_{i,j}} \quad (9)$$

où λ_{rep_i} est la longueur d'onde moyenne pour la $i^{\text{ème}}$ mesure de « répétabilité marche/arrêt » ($i = 1 \dots N$) comprenant chacune des n mesures ($j = 1 \dots n$) et λ_{test} est la valeur mesurée.

La contribution de l'incertitude-type de type A de chaque mesure de longueur d'onde centrale est donnée par l'Equation (10) (d'après l'Equation (A.3)).

$$u_{test_i} = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{test_{i,j}} - \lambda_{rep_i})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

La contribution à l'incertitude due à la « répétabilité marche/arrêt » peut être calculée d'après l'Equation (11) et l'Equation (12).

$$\overline{\lambda_{rep}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{rep_i} \quad (11)$$

$$urep = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda rep_i - \overline{\lambda rep})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

où $urep$ est la contribution à l'incertitude de la mesure de « répétabilité marche/arrêt » et N est le nombre d'ensembles de mesures de « répétabilité marche/arrêt ». Il convient de choisir un nombre de mesures n suffisamment grand pour chaque cycle des mesures de « répétabilité marche/arrêt » pour que le second terme de l'Equation (12) devienne négligeable par rapport au premier terme, ce qui donne l'Equation (13).

$$urep = \left[\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\lambda rep_i - \overline{\lambda rep})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

5.3.6 Mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde (facultative)

5.3.6.1 Généralités

Les mesures effectuées sur une plage de longueurs d'onde fournissent un facteur de correction amélioré et une estimation améliorée pour l'incertitude de l'instrument. Les mesures nécessitent un certain nombre de sources de référence verrouillées sur des transitions, une seule source pouvant être verrouillée sur un certain nombre de transitions ou plusieurs raies d'un peigne de fréquences de valeurs connues. Cet essai n'est pas requis si l'appareil de mesure de longueur d'onde soumis à essai doit être utilisé dans une seule bande UIT-T (Union Internationale des Télécommunications-T), sauf si les plus hauts niveaux de précision sont requis.

Le nombre de mesures pour chacune des mesures de dépendance par rapport à la longueur d'onde est calculé en utilisant l'Equation (8).

5.3.6.2 Procédure de mesure

- Laisser l'équipement atteindre l'équilibre.
- Configurer le logiciel d'acquisition de données.
- Soit verrouiller le laser sur la transition de référence et laisser suffisamment de temps au système pour se stabiliser, soit connecter tour à tour chacune des références verrouillées sur des transitions.
- Mesurer la longueur d'onde en utilisant le logiciel d'acquisition de données pour effectuer l'acquisition de n mesures.
- Réinitialiser la longueur d'onde de la source de référence.
- Recommencer à partir de c) jusqu'à avoir mesuré N ensembles de longueurs d'onde, (minimum suggéré de 3).
- La mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde est maintenant terminée.

La longueur d'onde centrale moyenne pour n mesures est donnée par:

$$\lambda wd_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda w_{test_{i,j}} \quad (14)$$

où λwd_i est la longueur d'onde moyenne pour la $i^{\text{ème}}$ longueur d'onde ($i = 1 \dots N$) en effectuant n mesures ($j = 1 \dots n$) pour chacune et λw_{test} est la valeur mesurée.

L'incertitude de chaque mesure de longueur d'onde centrale est donnée par l'Equation (15).

$$uwtest_i = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda wtest_{i,j} - \lambda wd_i)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

L'écart de longueur d'onde D_i est défini dans l'Equation (16).

$$D_i = \lambda wd_i - \lambda ref_i \quad (16)$$

La contribution de l'incertitude due à la dépendance de la longueur d'onde peut être calculée à partir de l'Equation (17) et l'Equation (18).

$$\overline{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \quad (17)$$

$$uwd = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \overline{D})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N uwtest_i^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

où uwd est la contribution à l'incertitude de la mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde et N est le nombre de longueurs d'onde. Il convient de choisir un nombre de mesures n suffisamment grand pour chaque cycle des mesures de dépendance par rapport à la longueur d'onde pour que le second terme de l'Equation (18) devienne négligeable par rapport au premier terme, ce qui donne l'Equation (19).

$$uwd = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \overline{D})^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

5.3.7 Mesure de répétabilité du connecteur (facultative)

5.3.7.1 Généralités

La mesure de répétabilité du connecteur est requise si l'entrée optique vers l'appareil de mesure de longueur d'onde est directement couplée à l'interféromètre, sans liaison intermédiaire par fibre optique. La prémisse est que de petits déplacements du connecteur à fibres optiques produisent des variations de l'alignement optique entre les faisceaux optiques de référence et inconnu. Cet essai peut être combiné avec la mesure de « répétabilité marche/arrêt » (5.3.5) pour simplifier le processus d'étalonnage global.

Le nombre de mesures pour chacune des mesures de répétabilité du connecteur est calculé en utilisant l'Equation (8).

5.3.7.2 Procédure de mesure

- Laisser l'équipement atteindre l'équilibre.
- Configurer le logiciel d'acquisition de données.
- Mesurer la longueur d'onde en utilisant le logiciel d'acquisition de données pour effectuer l'acquisition de n mesures.
- Déconnecter la fibre optique de l'appareil de mesure de longueur d'onde.
- Reconnecter la fibre optique à l'appareil de mesure de longueur d'onde.
- Répéter à partir de c) jusqu'à avoir effectué au moins N ensembles de mesures, généralement 10.
- La mesure de répétabilité du connecteur est maintenant terminée.

La longueur d'onde centrale moyenne pour n mesures est donnée par:

$$\lambda_{con_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{ctest_{i,j}} \quad (20)$$

où λ_{con_i} est la longueur d'onde moyenne pour la i ème mesure de répétabilité du connecteur ($i = 1 \dots N$) en effectuant n mesures ($j = 1 \dots n$) pour chacune et λ_{ctest} est la valeur mesurée.

L'incertitude de chaque mesure de connexion est donnée par l'Equation (21).

$$uctest_i = \left[\frac{1}{(n-1)n} \sum_{j=1}^n (\lambda_{ctest_{i,j}} - \lambda_{con_i})^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

La contribution à l'incertitude due à la répétabilité du connecteur peut être calculée d'après l'Equation (22) et l'Equation (23).

$$\overline{\lambda_{con}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{con_i} \quad (22)$$

$$ucon = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{con_i} - \overline{\lambda_{con}})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N uctest_i^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

où $ucon$ est la contribution à l'incertitude de la mesure de connecteur et N est le nombre d'ensembles de mesures. Il convient de choisir un nombre de mesures n suffisamment grand pour chaque cycle des mesures de répétabilité de connecteur pour que le second terme de l'Equation (23) devienne négligeable par rapport au premier terme, ce qui donne l'Equation (24).

$$ucon = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{con_i} - \overline{\lambda_{con}})^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

5.4 Incertitude d'étalonnage

Noter que la liste suivante peut ne pas être complète. Des contributions supplémentaires peuvent devoir être prises en compte en fonction du montage et de la procédure de mesure. Il convient d'utiliser les fondements mathématiques de l'Annexe A, pour calculer et déterminer l'incertitude.

- a) Mesure de stabilité
- b) Mesure de « répétabilité marche/arrêt »
- c) Mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde
- d) Répétabilité du connecteur
- e) Incertitude de l'étalon de référence
- f) Incertitude de la source (qualité de la stabilisation de la source sur l'étalon naturel)
- g) Résolution d'affichage de l'appareil de mesure de longueur d'onde d'essai

5.5 Rapport des résultats

Il convient de rapporter les résultats de chaque étalonnage comme demandé par l'ISO/CEI 17025. Les certificats d'étalonnage se référant à cette norme doivent au moins inclure les informations suivantes:

- a) Toutes les conditions d'étalonnage du processus d'étalonnage comme décrit en 5.2.
- b) Le ou les facteurs ou écarts de correction de l'appareil de mesure d'essai, si l'appareil de mesure d'essai n'a pas été réglé.
- c) À réception les facteurs ou les écarts de correction **et** après réglage les facteurs ou les écarts de correction dans le cas où un réglage a été effectué.
- d) L'incertitude d'étalonnage sous la forme d'une incertitude élargie comme décrit en 5.4 et à l'Annexe A.
- e) L'état d'instrument de l'appareil de mesure d'essai durant l'étalonnage.
- f) Une preuve que les mesures sont traçables (voir l'ISO/CEI 17025:2005, 5.10.4.1 c).

6 Etalonnage de puissance absolue

Si l'appareil de mesure de longueur d'onde est doté d'une fonction de mesure de puissance il doit alors être étalonné en utilisant la procédure d'étalonnage d'appareil de mesure de puissance (CEI 61315) en tenant compte des restrictions concernant le déplacement de l'instrument (4.3).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annexe A (normative)

Fondements mathématiques

A.1 Généralités

Cette annexe résume la forme d'évaluation, de combinaison et de rapport de l'incertitude de mesure. Elle est basée sur le guide ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. Elle ne dispense pas de consulter ce guide pour d'autres conseils.

Ce document distingue deux types d'évaluation d'incertitude de mesure. Le Type A est la méthode d'évaluation d'incertitude par analyse statistique d'une série de mesures sur le même mesurande. Le Type B est la méthode d'évaluation d'incertitude basée sur une autre connaissance.

A.2 Evaluation d'incertitude de Type A

L'évaluation de Type A de l'incertitude-type peut être appliquée lorsque plusieurs observations indépendantes ont été effectuées pour une quantité dans les mêmes conditions de mesure.

Pour une quantité X estimée d'après n observations indépendantes répétées X_i , la moyenne arithmétique est:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i . \quad (\text{A.1})$$

Cette moyenne est utilisée comme estimation de la quantité, c'est-à-dire $x = \bar{X}$. L'écart-type expérimental des observations est donné par:

$$s(X) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

où

$\bar{X}$ est la moyenne arithmétique des valeurs observées;

X_i sont les échantillons de mesure d'une série de mesures;

n est le nombre de mesures, on suppose qu'il est important, par exemple $n \geq 10$.

L'incertitude-type de Type A $u_{\text{typeA}}(x)$ associée à l'estimation x est l'écart-type expérimental de la moyenne:

$$u_{\text{typeA}}(x) = s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

A.3 Evaluation d'incertitude de Type B

L'évaluation de Type B de l'incertitude-type est la méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique d'une série d'observations. Elle est évaluée par une estimation scientifique basée sur toutes les informations disponibles sur la variabilité de la quantité.

Si l'estimation x d'une quantité X est issue des spécifications du fabricant, d'un certificat d'étalonnage, d'un manuel ou d'une autre source et que son incertitude citée $U(x)$ est indiquée comme étant un multiple k d'un écart-type, l'incertitude-type $u(x)$ est simplement la valeur citée divisée par le multiplicateur.

$$u(x) = U(x) / k \quad (\text{A.4})$$

Si seules les limites supérieure et inférieure $X_{\max}$ et $X_{\min}$ peuvent être estimées pour la valeur de la quantité X (par exemple les spécifications du fabricant ou une gamme de températures), on suppose une distribution de probabilité rectangulaire; la valeur estimée est

$$x = \frac{1}{2} (X_{\max} + X_{\min}) \quad (\text{A.5})$$

et l'incertitude-type est

$$u(x) = \frac{1}{2\sqrt{3}} (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{A.6})$$

La contribution à l'incertitude-type associée à l'estimation de sortie y résultant de l'incertitude-type associée à l'estimation d'entrée x est

$$u(y) = c \cdot u(x) \quad (\text{A.7})$$

où c est le coefficient de sensibilité associé à l'estimation d'entrée x .

A.4 Détermination de l'incertitude-type composée

L'incertitude-type composée est utilisée pour recueillir un certain nombre d'incertitudes individuelles dans un nombre simple. L'incertitude-type composée est basée sur l'indépendance statistique des incertitudes individuelles; elle est calculée en prenant la racine carrée de la somme de toutes les incertitudes-types obtenues d'après l'évaluation de Type A et de Type B.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (\text{A.8})$$

où

- i est le nombre courant de contributions individuelles;
- $u_i(y)$ sont les contributions d'incertitude-type;
- N est le nombre d'incertitudes.

NOTE Il est acceptable de négliger dans cette équation les contributions d'incertitude qui sont plus petites que 1/10 de la contribution la plus grande, car en les élevant au carré, on réduira leur valeur significative de 1/100 par rapport à la contribution la plus grande.

Lorsque les quantités ci-dessus doivent être utilisées comme base pour d'autres calculs d'incertitude, l'incertitude-type composée, u_c , peut alors être réinséré dans l'Equation (A.8). Malgré son origine partielle de Type A, il convient que u_c soit considéré comme décrivant une incertitude de Type B.

A.5 Rapport des incertitudes

Dans les rapports d'étalonnage et les fiches techniques, les incertitudes-types composées doivent être rapportées sous forme d'incertitudes étendues, ainsi que le niveau de confiance applicable. Les facteurs ou écarts de correction doivent être rapportés. L'incertitude étendue U est obtenue en multipliant l'incertitude-type $u_c(y)$ par un facteur de recouvrement k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (\text{A.9})$$

Pour obtenir un niveau de confiance d'approximativement 95 %, niveau par défaut, alors $k = 2$. Si l'on choisit un niveau de confiance d'approximativement 99 %, alors $k \approx 3$. Les valeurs ci-dessus pour k sont valides dans certaines conditions (voir ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*); si ces conditions ne sont pas satisfaites, on doit utiliser des facteurs de recouvrement plus grands pour atteindre ces niveaux de confiance.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-2:2011

Annexe B (informative)

Rejet des aberrations

B.1 Vue d'ensemble

Les appareils de mesure de longueur d'onde peuvent occasionnellement fournir des relevés de longueur d'onde parasites qui sont très éloignés de la valeur réelle. Ceci peut être provoqué par des facteurs tels que la cohérence du laser, la modulation du niveau de puissance optique ou un fonctionnement incorrect du système multiplicateur de franges. Si ces aberrations ne sont pas éliminées, les valeurs moyennes sont alors biaisées et l'écart-type de l'ensemble de données est surestimé.

B.2 Hypothèses

L'analyse exige qu'un échantillon des données utilisées pour obtenir une estimation de la moyenne soit suffisamment grand pour que l'estimation de l'écart-type soit réaliste. Cependant, il existe un compromis entre la confiance statistique, la taille de l'échantillon et le temps d'acquisition.

B.3 Mesure et procédure d'analyse

Si l'on soupçonne la présence d'aberrations dans un ensemble de données, la procédure recommandée consiste à appliquer l'essai de Grubbs [1], [2], [3]¹

- a) Acquérir un ensemble de données.
- b) Calculer la moyenne et l'écart-type de l'échantillon.
- c) Prendre le point de données x_{ext} le plus éloigné de la moyenne, calculer Z d'après l'Equation (B.1):

$$Z = \frac{|x_{\text{ext}} - \bar{x}|}{s(x)} \quad (\text{B.1})$$

où $s(x)$ est donné par l'Equation (A.2).

- d) Comparer la valeur de Z aux valeurs critiques Z_c énumérées dans le Tableau B.1. Si Z est $> Z_c$, la probabilité pour que la valeur extrême x_{ext} soit une aberration est de 95 %. Rejeter cette valeur et répéter les étapes b) à d) jusqu'à ce que $Z < Z_c$ pour la taille d'échantillon appropriée N . Si $Z < Z_c$, on suppose que toutes les valeurs de données de l'échantillon sont des relevés valides.

¹ Les chiffres entre crochets se rapportent à la bibliographie.

Tableau B.1 – Valeurs critique Z_c en fonction de la taille de l'échantillon N

N	Z_c	N	Z_c
3	1,15	27	2,86
4	1,48	28	2,88
5	1,71	29	2,89
6	1,89	30	2,91
7	2,02	31	2,92
8	2,13	32	2,94
9	2,21	33	2,95
10	2,29	34	2,97
11	2,34	35	2,98
12	2,41	36	2,99
13	2,46	37	3,00
14	2,51	38	3,01
15	2,55	39	3,03
16	2,59	40	3,04
17	2,62	50	3,13
18	2,65	60	3,20
19	2,68	70	3,26
20	2,71	80	3,31
21	2,73	90	3,35
22	2,76	100	3,38
23	2,78	110	3,42
24	2,80	120	3,44
25	2,82	130	3,47
26	2,84	140	3,49

Annexe C (informative)

Exemple d'étalonnage d'un appareil de mesure de longueur d'onde unique

Les chiffres présentés ici se réfèrent à un appareil de mesure de longueur d'onde et à un laser à cavité externe, verrouillés sur une transition d'absorption (R19) dans le CO à 13,6 hPa avec une longueur d'onde de $1\,561,257\,709 \pm 0,000\,026$ nm.

C.1 Mesure de stabilité

Le bilan d'incertitude type pour les contributions de Type A d'une mesure de stabilité est représenté dans le Tableau C.1.

Tableau C.1 – Contributions d'incertitude de Type A pour une mesure de stabilité

Symbole	Source d'incertitude	Valeur fm	Fonction de densité de probabilité	Diviseur	u_i fm
u_{as}	Mesure individuelle Type A	1,85	Gaussienne	1	1,85
u_{bs}	Stabilité de la longueur d'onde centrale	1,78	Gaussienne	1	1,78
	Incertitude composée u_s	2,57			

Où les paramètres u_{as} et u_{bs} sont les deux termes de l'Equation (6) tels que:

$$u_{as} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.1)$$

et

$$u_{bs} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{s_i} - \overline{\lambda_s})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.2)$$

C.2 Mesure de « répétabilité marche/arrêt »

Le bilan d'incertitude type pour une mesure de « répétabilité marche/arrêt » est représenté dans le Tableau C.2. Les contributions d'incertitude des mesures individuelles sont petites, comparées à la « répétabilité marche/arrêt » de la longueur d'onde centrale.

Tableau C.2 – Contributions pour une mesure de « répétabilité marche/arrêt »

Symbole	Source d'incertitude	Valeur fm	Fonction de densité de probabilité	Diviseur	u_i fm
u_{ar}	Mesure individuelle Type A	7,7	Gaussienne	1	7,7
u_{br}	« Répétabilité marche/arrêt » des longueurs d'onde centrales	26,0	Gaussienne	1	26
Incertitude composée u_{rep}		27,1			

Où les paramètres u_a et u_r sont les deux termes de l'Equation (12) tels que:

$$u_{ar} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{test_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.3)$$

et

$$u_{br} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lambda_{rep_i} - \bar{\lambda}_{rep})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.4)$$

C.3 Mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde

Les résultats type et le bilan d'incertitude pour une mesure de dépendance par rapport à la longueur d'onde sont représentés dans le Tableau C.3. Les contributions d'incertitude des mesures individuelles sont petites, comparées à la dépendance par rapport à la longueur d'onde de la longueur d'onde centrale.

Tableau C.3 – Bilan d'incertitude pour la dépendance par rapport à la longueur d'onde

Paramètre	Ligne	Différence fm	Incertitude fm
	P(27)	-7,3	7,6
	P(28)	-5,8	7,7
	P(29)	-44,1	7,8
	P(30)	-15,7	7,7
	P(31)	-39,9	7,5
	P(32)	-13,9	7,6
	P(33)	-21,6	7,4
Premier terme de l'Equation 17			15,2
Second terme de l'Equation 17			7,6
Incertitude de dépendance par rapport à la longueur d'onde u_{wd}			17,0

C.4 Résultats d'étalonnage de l'appareil de mesure de longueur d'onde

Les résultats des essais de « répétabilité marche/arrêt » (qui ont été obtenus en incluant la contribution de la répétabilité du connecteur) et de stabilité, sont combinés avec l'incertitude de la référence, fournissant l'incertitude totale de la mesure, comme représenté dans le Tableau C.4. Les contributions au bilan d'incertitude dues à un verrouillage imparfait du laser sur la transition n'ont pas été incluses explicitement. On a supposé que ces contributions augmentent la composante de stabilité de Type A du bilan. La contribution de Type B est due à la résolution d'affichage de l'appareil de mesure de longueur d'onde d'essai.

Tableau C.4 – Bilan d'incertitude pour l'étalonnage de l'appareil de mesure de longueur d'onde

Source d'incertitude	Valeur f_m	Fonction de densité de probabilité	Diviseur	u_{f_m}
Référence	13,1	Gaussienne	1	13,1
« Répétabilité marche/arrêt » u_{rep}	27,1	Gaussienne	1	27,1
Incertitude de dépendance par rapport à la longueur d'onde u_{wd}	17,0	Gaussienne	1	17,0
Stabilité de Type A u_s	2,57	Gaussienne	1	2,57
Type B	100	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	57,7
Incertitude composée u_c				67,3
Incertitude étendue U				134,6

Annexe D (informative)

Bandes de longueurs d'onde UIT (Union Internationale des Télécommunications)

Les principales bandes de télécommunications définies par l'UIT sont énumérées dans le Tableau D.1.

**Tableau D.1 – Bandes UIT-T (Union Internationale des Télécommunications-T)
dans différentes unités**

Bande	Descripteur	Début			Fin		
		nm	GHz	cm ⁻¹	nm	GHz	cm ⁻¹
Bande O	Originale	1 260	237 931	7 937	1 360	220 436	7 353
Bande E	Etendue	1 360	220 436	7 353	1 460	205 337	6 849
Bande S	Longueur d'onde courte	1 460	205 337	6 849	1 530	195 943	6 536
Bande C	Classique	1 530	195 943	6 536	1 565	191 561	6 390
Bande L	Grande longueur d'onde	1 565	191 561	6 390	1 625	184 488	6 154
Bande U	Très grande longueur d'onde	1 625	184 488	6 154	1 675	178 981	5 970