

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electromechanical elementary relays –
Part 2: Reliability**

**Relais électromécaniques élémentaires –
Partie 2: Fiabilité**





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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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



IEC 61810-2

Edition 2.0 2011-02

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electromechanical elementary relays –
Part 2: Reliability**

**Relais électromécaniques élémentaires –
Partie 2: Fiabilité**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

V

ICS 29.120.70

ISBN 978-2-88912-376-6

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 General considerations.....	9
5 Test conditions	10
5.1 Test items	10
5.2 Environmental conditions	10
5.3 Operating conditions	10
5.4 Test equipment	11
6 Failure criteria	11
7 Output data	11
8 Analysis of output data	11
9 Presentation of reliability measures	12
Annex A (normative) Data analysis	13
Annex B (informative) Example of numerical and graphical Weibull analysis.....	22
Annex C (informative) Example of cumulative hazard plot.....	26
Annex D (informative) Gamma function.....	32
Bibliography.....	33
Figure A.1 – An example of Weibull probability paper	16
Figure A.2 – An example of cumulative hazard plotting paper	18
Figure A.3 – Plotting of data points and drawing of a straight line	18
Figure A.4 – Estimation of distribution parameters	19
Figure B.1 – Weibull probability chart for the example.....	24
Figure C.1 – Estimation of distribution parameters.....	28
Figure C.2 – Cumulative hazard plots	30
Table B.1 – Ranked failure data.....	23
Table C.1 – Work sheet for cumulative hazard analysis	26
Table C.2 – Example work sheet.....	29
Table D.1 – Values of the gamma function.....	32

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMECHANICAL ELEMENTARY RELAYS –**Part 2: Reliability****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 61810-2 has been prepared by IEC technical committee 94: All-or-nothing electrical relays.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2005. This edition constitutes a technical revision.

The main changes with respect to the previous editions are listed below:

- inclusion of both numerical and graphical methods for Weibull evaluation;
- establishment of full coherence with the second edition of the basic reliability standard IEC 61649;
- deletion of previous Annex A and Annex D since both annexes are contained in IEC 61810-1.

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

FDIS	Report on voting
94/316/FDIS	94/325/RVD

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

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

A list of all parts of the IEC 61810 series can be found, under the general title *Electromechanical elementary relays*, on the IEC website.

This International Standard is to be used in conjunction with IEC 61649:2008.

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.

INTRODUCTION

Within the IEC 61810 series of basic standards covering elementary electromechanical relays, IEC 61810-2 is intended to give requirements and tests permitting the assessment of relay reliability. All information concerning endurance tests for type testing have been included in IEC 61810-1.

NOTE According to IEC 61810-1, a specified value for the electrical endurance under specific conditions (e.g. contact load) is verified by testing 3 relays. None is allowed to fail. Within this IEC 61810-2, a prediction of the reliability of a relay is performed using statistical evaluation of the measured cycles to failure of a larger number of relays (generally 10 or more relays).

Recently the technical committee responsible for dependability (TC 56) has developed a new edition of IEC 61649 dealing with Weibull distributed test data. This second edition contains both numerical and graphical methods for the evaluation of Weibull-distributed data.

On the basis of this basic reliability standard, IEC 61810-2 was developed. It comprises test conditions and an evaluation method to obtain relevant reliability measures for electromechanical elementary relays. The life of relays as non-repairable items is primarily determined by the number of operations. For this reason, the reliability is expressed in terms of mean cycles to failure (MCTF).

Commonly, equipment reliability is calculated from mean time to failure (MTTF) figures. With the knowledge of the frequency of operation (cycling rate) of the relay within an equipment, it is possible to calculate an effective MTTF value for the relay in that application.

Such calculated MTTF values for relays can be used to calculate respective reliability, probability of failure, and availability (e.g. MTBF (mean time between failures)) values for equipment into which these relays are incorporated.

Generally it is not appropriate to state that a specific MCTF value is “high” or “low”. The MCTF figures are used to make comparative evaluations between relays with different styles of design or construction, and as an indication of product reliability under specific conditions.

ELECTROMECHANICAL ELEMENTARY RELAYS –

Part 2: Reliability

1 Scope

This part of IEC 61810 covers test conditions and provisions for the evaluation of endurance tests using appropriate statistical methods to obtain reliability characteristics for relays. It should be used in conjunction with IEC 61649.

This International Standard applies to electromechanical elementary relays considered as non-repaired items (i.e. items which are not repaired after failure), whenever a random sample of items is subjected to a test of cycles to failure (CTF).

The lifetime of a relay is usually expressed in number of cycles. Therefore, whenever the terms “time” or “duration” are used in IEC 61649, this term should be understood to mean “cycles”. However, with a given frequency of operation, the number of cycles can be transformed into respective times (e.g. times to failure (TTF)).

The failure criteria and the resulting characteristics of elementary relays describing their reliability in normal use are specified in this standard. A relay failure occurs when the specified failure criteria are met.

As the failure rate for elementary relays cannot be considered as constant, particularly due to wear-out mechanisms, the times to failure of tested items typically show a Weibull distribution. This standard provides both numerical and graphical methods to calculate approximate values for the two-parameter Weibull distribution, as well as lower confidence limits.

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 60050-191:1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 191: Dependability and quality of service*

IEC 60050-444:2002, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 444: Elementary relays*

IEC 60300-3-5:2001, *Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles*

IEC 61649:2008, *Weibull analysis*

IEC 61810-1:2008, *Electromechanical elementary relays – Part 1: General requirements*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-191 and IEC 60050-444, some of which are reproduced below, as well as the following, apply.

3.1

item

any component that can be individually considered

[IEC 60050-191:1990, 191-01-01, modified]

NOTE For the purpose of this standard, items are elementary relays.

3.2

non-repaired item

item which is not repaired after a failure

[IEC 60050-191:1990, 191-01-03, modified]

3.3

cycle

operation and subsequent release/reset

[IEC 60050-444:2002, 444-02-11]

3.4

frequency of operation

number of cycles per unit of time

[IEC 60050-444:2002, 444-02-12]

3.5

reliability

ability of an item to perform a required function under given conditions for a given number of cycles or time interval

[IEC 60050-191:1990, 191-02-06, modified]

NOTE 1 It is generally assumed that the item is in a state to perform this required function at the beginning of the time interval.

NOTE 2 The term “reliability” is also used as a measure of reliability performance (see IEC 60050-191:1990, 191-12-01).

3.6

reliability test

experiment carried out in order to measure, quantify or classify a reliability measure or property of an item

[IEC 60300-3-5:2001, 3.1.27]

3.7

life test

test with the purpose of estimating, verifying or comparing the lifetime of the class of items being tested

[IEC 60300-3-5:2001, 3.1.17, modified]

3.8
cycles to failure

CTF

total number of cycles of an item, from the instant it is first put in an operating state until failure

3.9
mean cycles to failure

MCTF

expectation of the number of cycles to failure

3.10
time to failure

TTF

total time duration of operating time of an item, from the instant it is first put in an operating state until failure

[IEC 60050-191:1990, 191-10-02, modified]

3.11
mean time to failure

MTTF

expectation of the time to failure

[IEC 60050-191:1990, 191-12-07]

3.12
useful life

number of cycles or time duration until a certain percentage of items have failed

NOTE In this standard, this percentage is defined as 10 %.

3.13
failure

termination of the ability of an item to perform a required function

[IEC 60050-191:1990, 191-04-01, modified]

3.14
malfunction

single event when an item does not perform a required function

3.15
contact failure

occurrence of break and/or make malfunctions of a contact under test, exceeding a specified number

3.16
failure criteria

set of rules used to decide whether an observed event constitutes a failure

[IEC 60300-3-5:2001, 3.1.10]

3.17
contact load category

classification of relay contacts dependent on wear-out mechanisms

NOTE Various contact load categories are defined in IEC 61810-1.

4 General considerations

The provisions of this part of IEC 61810 are based on the relevant publications on dependability. In particular, the following documents have been taken into account: IEC 60050-191, IEC 60300-3-5 and IEC 61649.

The aim of reliability testing as given in this standard is to obtain objective and reproducible data on reliability performance of elementary relays representative of standard production quality. The tests described and the related statistical tools to gain reliability measures based on the test results can be used for the estimation of such reliability measures, as well as for the verification of stated measures.

NOTE 1 Examples for the application of reliability measurements are:

- establishment of reliability measures for a new relay type;
- comparison of relays with similar characteristics, but produced by different manufacturers;
- evaluation of the influence, on a relay, of different materials or different manufacturing solutions;
- comparison of a new relay with a relay which has already worked for a specific period of time;
- calculation of the reliability of an equipment or system incorporating one or more relays.

According to Clauses 8 and 9 of IEC 60300-3-5, for non-repaired items showing a non-constant failure rate the Weibull model is the most appropriate statistical tool for evaluation of reliability measures. This analysis procedure is described in IEC 61649.

Elementary relays within the scope of this standard are considered as non-repaired items. They generally do not exhibit a constant failure rate but a failure rate increasing with time, being tested until wear-out mechanisms become predominant. The cycles to failure of a random sample of tested items typically show the Weibull distribution.

NOTE 2 In cases where no wear-out mechanisms prevail, random failures with constant failure rate can be assumed. Then the shape parameter β of the Weibull distribution equals 1 and the reliability function becomes the well-known exponential law. For relay tests where only very few failures (or even no failures at all) occur, the WeiBayes approach of IEC 61649 might be appropriate. Another option may be the application of the sudden death method described in Clause 13 of IEC 61649.

The statistical procedures of this standard are valid only when at least 10 relevant failures are recorded.

Upon special agreement between manufacturer and user, the test may be performed with even less than 10 relays, provided the uncertainty of the estimated Weibull parameters is acceptable to them. In such a case the minimum number of tested relays shall be specified; this number then replaces the minimum number of 10 relays wherever prescribed in this standard. However, it shall be noted that this reduction of relay specimens is only acceptable where the graphical methods of A.5.1 are applied. For the numerical method of A.5.2 at least 10 failures are required, since the maximum likelihood estimation (MLE) is a computational method for larger sample sizes, i.e. when at least 10 relevant failures are recorded (see 9.3 of IEC 61649).

The first step in the analysis of the recorded cycles to failure (CTF) of the tested relays is the determination of the two distribution parameters of the Weibull distribution. In a second step, the mean cycles to failure (MCTF) is calculated as a point estimate. In a third step, the useful life is determined as the lower confidence limit of the number of cycles by which 10 % of the relay population will have failed (B_{10}).

With a given frequency of operation these reliability measures expressed in number of cycles (MCTF) can be transformed into respective times (MTTF), see Annex B for an example.

The statistical procedures require some appropriate computing facility. Software for evaluation of Weibull distributed data is commercially available on the market. Such software

may be used for the purpose of this standard provided it shows equivalent results when the data given in Annex B are used.

Since the number of cycles to failure highly depends on the specific set of test conditions (particularly the electrical loading of the relay contacts), values for MCTF and useful life derived from test data apply only to this set of test conditions, which have to be stated by the manufacturer together with the reliability measures.

5 Test conditions

5.1 Test items

As a minimum of 10 failures need to be recorded to perform the analysis described in this standard, 10 or more items (relays) should be submitted to the test. This allows the test to be truncated when at least 10 relays have failed. When the test is truncated at a specific number of cycles, all relays that have not yet failed may be considered to fail at that number of cycles (worst case assumption). However, at least 70 % of the tested relays shall fail physically. This allows the test to be carried out with 10 relays only, even when the test is truncated before all relays have physically failed (with a minimum of 7 physical failures recorded).

The items shall be selected at random from the same production lot and shall be of identical type and construction. No action is allowed on the test items from the time of sampling until the test starts.

Where any particular burn-in procedure or reliability stress screening is employed by the manufacturer prior to sampling, this shall apply to all production. The manufacturer shall describe and declare such procedures, together with the test results.

Unless otherwise specified by the manufacturer, all contacts of each relay under test shall be loaded as stated and monitored continuously during the test.

The test starts with all items and is stopped at some number of cycles. At that instant a certain number of items (minimum: 10 items) have failed. The number of cycles to failure of each of the failed items is recorded.

Items failed during the test are not replaced once they fail.

5.2 Environmental conditions

The testing environment shall be the same for all items.

- The items shall be mounted in the manner intended for normal service; in particular, relays for mounting onto printed circuit-boards are tested in the horizontal position, unless otherwise specified.
- The ambient temperature shall be as specified by the manufacturer.
- All other influence quantities shall comply with the values and tolerance ranges given in Table 1 of IEC 61810-1, unless otherwise specified.

5.3 Operating conditions

The set of operating conditions

- rated coil voltage(s);
- coil suppression (if any);
- frequency of operation;
- duty factor;

- contact load(s)

shall be as specified by the manufacturer.

Recommended values should be chosen from those given in Clause 5 of IEC 61810-1.

The test is performed on each contact load and each contact material as specified by the manufacturer.

All specified devices (for example, protective or suppression circuits), if any, which are part of the relay or stated by the manufacturer as necessary for particular contact loads, should be operated during the test.

The contacts shall be continuously monitored to detect malfunctions to open and malfunctions to close, as well as unintended bridging (simultaneous closure of make and break side of a changeover contact).

The contacts are connected to the load(s) in accordance with Table 12 of IEC 61810-1 as specified and indicated by the manufacturer.

5.4 Test equipment

The test circuit described in Annex C of IEC 61810-1 shall be used, unless otherwise specified by the manufacturer and explicitly indicated in the test report.

6 Failure criteria

Whenever any contact of a relay under test fails to open or fails to close or exhibits unintended bridging, this shall be considered as a malfunction.

Three severity levels are specified:

- severity A: the first detected malfunction is defined as a failure;
- severity B: the sixth detected malfunction or two consecutive malfunctions are defined as a failure;
- severity C: as specified by the manufacturer.

The severity level used for the test shall be as prescribed by the manufacturer and stated in the test report.

7 Output data

The data to be analysed consists of cycles to failure (CTF) for each of the items put on test. These CTF values have to be known exactly. However, it is not necessary to gather the CTF values for all items under test, as the test may be stopped before all items have failed, provided at least 10 CTF values from different failed items are available.

8 Analysis of output data

The evaluation of the CTF values obtained during the test shall be carried out in accordance with the procedures given in Annex A.

9 Presentation of reliability measures

The basic reliability measures applicable to elementary relays as described in this standard and obtained from the data analysis shall be provided.

However, since the values obtained for these reliability measures using the procedures of Annex A depend to a great extent on the basic design characteristics of the relay, the test conditions of Clause 5 and the failure criteria of Clause 6, the following information shall also be provided together with the test results:

- relay type for which the results are valid:
 - a) contact material;
 - b) deviations from standard types (if any);
 - c) type of termination;
- set of operating conditions (see 5.3):
 - a) rated coil voltage(s);
 - b) coil suppression (if any);
 - c) frequency of operation;
 - d) duty factor;
 - e) contact load(s);
 - f) ambient conditions;
- test schematic selected (see Clause C.3 of IEC 61810-1, or test circuit details, if different from the circuit described in Clause C.1 of IEC 61810-1);
- severity level (see Clause 6).

In addition basic data of the test and the related analysis (see Annex A) shall be given in the test report:

- number of items (n) on test;
- number of failed items (r) registered during the test (minimum 10);
- time (given in number of cycles) when the test was stopped (T);
- confidence level, if other than 90 %.

The test results are applicable to the samples specifically tested and variants, as stipulated by the manufacturer, provided that the relevant design characteristics remain the same.

NOTE Acceptable examples are coil variants with the same ampere-turns. Unacceptable examples are variants with AC in place of DC coils, or different contact dynamics.

When test results for various operating conditions (for example, contact loads) are available, they may be compiled as a family of curves or in suitable tables. However, it shall be ensured that a sufficient number of points are determined when plotting such curves.

Annex A (normative)

Data analysis

A.1 General

This annex has been derived from the reliability standard IEC 61649:2008 with certain modifications necessary to adopt the procedures to elementary relays. The distribution considered in the reliability standard is of the Weibull type, which has been empirically recognized to correspond to an appropriate data analysis for elementary relays.

The graphical method, as well as the numerical method are covered in IEC 61649. In addition, not only the Weibull probability analysis but also the Weibull hazard analysis is taken up in the graphical method. Here, Weibull hazard and Weibull probability analyses are applied to complete and incomplete data, respectively. The latter is especially useful for the reliability analysis of relays because many data sets obtained from life tests are incomplete (censored tests).

NOTE 1 Incomplete data are the data sets obtained from the test after either a certain number of failures or a certain number of cycles, when there are still items functioning, whereas complete data are the data sets without censoring.

This annex deals with the Weibull probability plot and the Weibull hazard plot for the graphical method based upon median rank regression (MRR) principles, and the maximum likelihood estimation (MLE) for the numerical method in accordance with the provisions of IEC 61649.

When more in-depth information is required, IEC 61649 is to be consulted.

The concept “time” is to be understood as “cycles” in the case of relays. However, with a given frequency of operation, the values indicated in numbers of cycles can be transformed into respective times.

NOTE 2 Whereas the variable “time” (symbol: t) is used within IEC 61649, this standard therefore is based on the variable “cycles” (symbol: c).

For the sake of consistency, the following symbols and equations are reproduced in accordance with IEC 61649.

A.2 Abbreviations

CDF	Cumulative distribution function
MRR	Median rank regression
MLE	Maximum likelihood estimation
MCTF	Mean cycles to failure
PDF	Probability density function

A.3 Symbols and definitions

The following symbols are used in this Annex A, and in both Annex B and Annex C. Auxiliary constants and functions are defined in the text.

$f(c)$	probability density function
$F(c)$	cumulative distribution function (failure probability)

$h(c)$	hazard function (or instantaneous failure rate)
$H(c)$	cumulative hazard function
$R(c)$	reliability function of the Weibull distribution (survival probability)
B_{10}	expected time at which 10 % of the population have failed (10 % fractile of the lifetime)
c	cycle – variable
$\hat{m}$	mean cycles to failure (MCTF)
β	Weibull shape parameter (indicating the rate of change of the instantaneous failure rate with time)
η	Weibull scale parameter or characteristic life (at which 63,2 % of the items have failed)
σ	standard deviation

A.4 Weibull distribution

The fundamental Weibull formulae are defined as follows.

NOTE For more information, reference is made to IEC 61649.

The probability density function (PDF) of the Weibull distribution is:

$$f(c) = \beta \frac{c^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{c}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{A.1})$$

The cumulative distribution function (CDF), or the expected fraction failing at cycle c :

$$F(c) = 1 - e^{-(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.2})$$

The reliability function $R(c)$, or the expected fraction surviving at cycle c :

$$R(c) = 1 - F(c) = e^{-(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.3})$$

The hazard function (or instantaneous failure rate) $h(c)$ is:

$$h(c) = \beta \frac{c^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (\text{A.4})$$

The cumulative hazard function $H(c)$ is:

$$H(c) = \left(\frac{c}{\eta}\right)^\beta \quad (\text{A.5})$$

A.5 Procedure

A.5.1 Graphical methods

A.5.1.1 Overview

Graphical analysis is performed by plotting the data on a suitably designed Weibull probability paper, fitting a straight line through the data, and estimating the distribution parameters (the

shape parameter, and the characteristic life or scale parameter). Then the reliability characteristics (i.e. MCTF, B_{10} value, and standard deviation) are calculated.

Graphical methods benefit from relatively straightforward processes and availability for data with a mixture of failure modes. The fundamentals of the analysis and an outline of the processes applied to Weibull probability and Weibull hazard plots are given in this clause.

A.5.1.2 Weibull probability plot

A.5.1.2.1 Ranking and plotting positions

To make the Weibull plot, rank the data from the lowest to the highest number of cycles to failure (c_i). This ranking will set up the plotting positions for the cycle (c), axis and the ordinate, cumulative distribution function ($F(c)$), in percentage values.

$F(c)$ is calculated by median rank regression (MRR).

An approximate value may be obtained using Benard's approximation (see 7.2.1 of IEC 61649:2008):

$$F(c_i) = (i - 0,3) / (n + 0,4) \% \quad (\text{A.6})$$

where

n is the number of tested items;

i is the ranked position of the data item.

Data points of $(c_i, F(c_i))$ are plotted on the Weibull probability plotting paper.

For details, see 7.2.1 and 7.2.2 of IEC 61649:2008.

A.5.1.2.2 Weibull probability plotting paper

The design of Weibull probability paper is shown below.

The equation (A.3) can be rewritten to the following equation:

$$\frac{1}{1 - F(c)} = e^{(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.7})$$

Taking normal logarithms of both sides of the equation (A.7) twice gives an equation of a straight line as shown below:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(c)} = \beta \ln c - \beta \ln \eta \quad (\text{A.8})$$

The equation is a straight line of the form $y = ax + b$. Weibull paper is designed by plotting the cumulative probability of failure using a log log reciprocal scale against c on a log scale. When the equation is plotted as a function of $\ln(c)$, the slope of the straight line plotted in this manner will be β , the shape parameter, i.e.

$$y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(c)} \quad (\text{A.9})$$

where

$$a = \beta;$$

$$x = \ln(c);$$

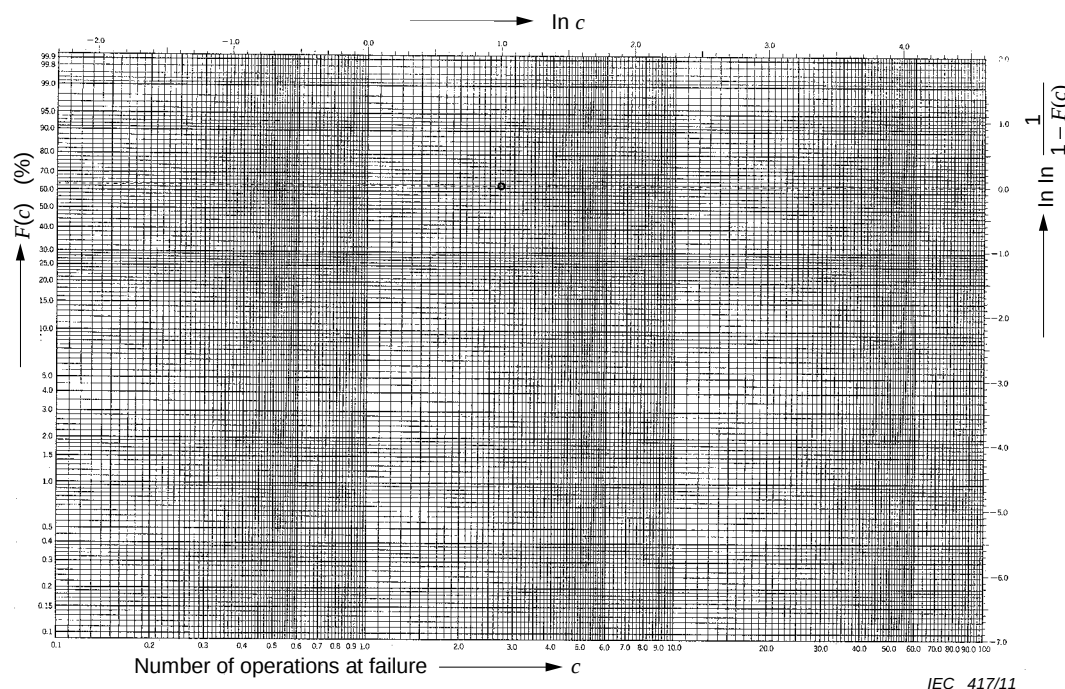
$$b = -\beta \ln(\eta).$$

The scale parameter is obtained from $b = -\beta \ln(\eta)$ as follows:

$$\eta = \exp[-b_0/\beta] \quad (\text{A.10})$$

where b_0 is the value of y when c is equal to 1, that is $\ln(c) = 0$.

When data are following a Weibull distribution, those data plotted on a Weibull distribution paper become a straight line. Figure A.1 shows a blank Weibull distribution paper.



NOTE Partially rewritten on the basis of the paper published by JUSE PRESS

Figure A.1 – An example of Weibull probability paper

A.5.1.3 Hazard plot

A.5.1.3.1 Ranking and plotting positions

To perform the hazard plot, rank the data from the lowest to the highest number of cycles to failure. This ranking will set up the plotting positions for the cycle (c), axis and the ordinate, cumulative hazard value $H(c)$, in percentage values. $H(c)$ is calculated by hazard value $h(c)$. Data points of $(c_i, H(c_i))$ are plotted on the cumulative hazard paper.

For details, see 7.3 of IEC 61649:2008.

A.5.1.3.2 Cumulative hazard plotting paper

The design of cumulative hazard paper is shown below.

Taking natural logarithms of both sides of equation (A.5) gives:

$$\ln H(c) = \beta \ln c - \beta \ln \eta \quad (\text{A.11})$$

The equation is a straight line of the form $y = ax + b$. Cumulative hazard paper is designed by plotting the cumulative probability of failure using a log reciprocal scale against c on a log scale. When the equation is plotted as a function of $\ln(c)$, the slope of the straight line plotted in this manner will be β , the shape parameter, i.e.

$$y = \ln H(c) \quad (\text{A.12})$$

where

$$a = \beta;$$

$$x = \ln (c);$$

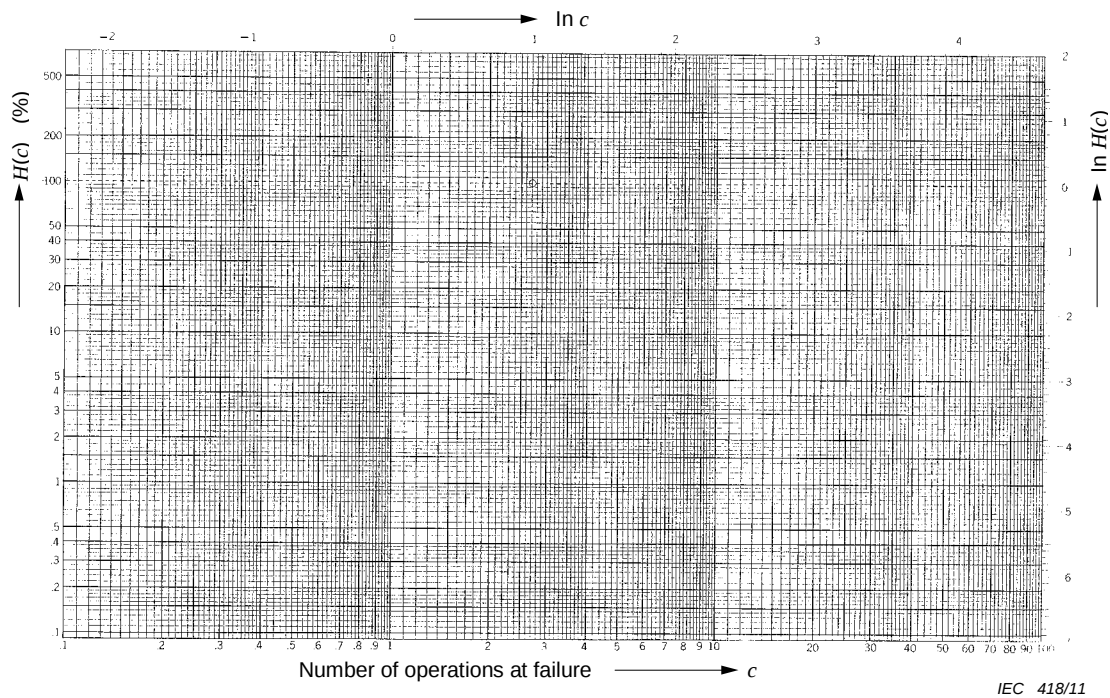
$$b = -\beta \ln (\eta).$$

The scale parameter is obtained from $b = -\beta \ln (\eta)$ as follows:

$$\eta = \exp [-b_0/\beta] \quad (\text{A.13})$$

where b_0 is the value of y when c is equal to 1, that is $\ln(c) = 0$.

When data points are following a cumulative hazard function, those data points plotted on a cumulative hazard paper become a straight line. Figure A.2 shows a blank cumulative hazard paper.



NOTE Partially rewritten on the basis of the paper published by JUSE PRESS

Figure A.2 – An example of cumulative hazard plotting paper

A.5.1.4 Estimate values of distribution parameters and characteristics

Distribution parameters and characteristics in the Weibull probability plot and the hazard plot are common.

Draw a straight line (that best fits the data) through the data points on the plotting paper (Figure A.3).

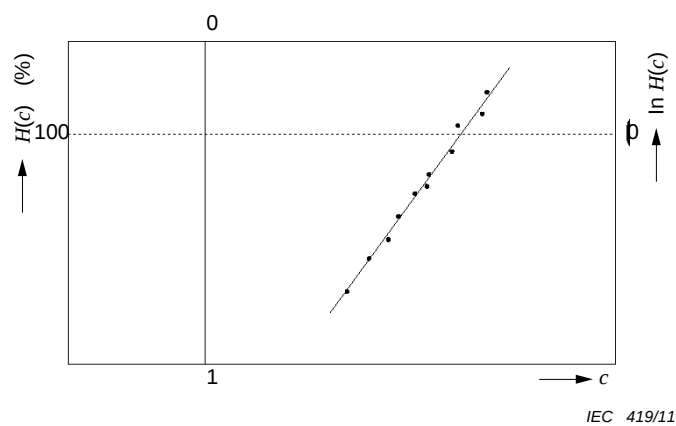


Figure A.3 – Plotting of data points and drawing of a straight line

- 1) The point estimate of the shape parameter, $\hat{\beta}$

$\hat{\beta}$ is derived from the slope a of the plotted straight line.

A parallel line is drawn above the original plotted line, through the coordinate point ($\ln c = 1$, $\ln H(c) = 0$). The ordinate value of this point is equivalent to $H(c) = 100\%$ (or $F(c) = 63,2\%$).

$\hat{\beta}$ is read from the value of $\ln H(c)$ corresponding to the cross point of this parallel line and a vertical line through $\ln c = 0$, as shown in Figure A.4.

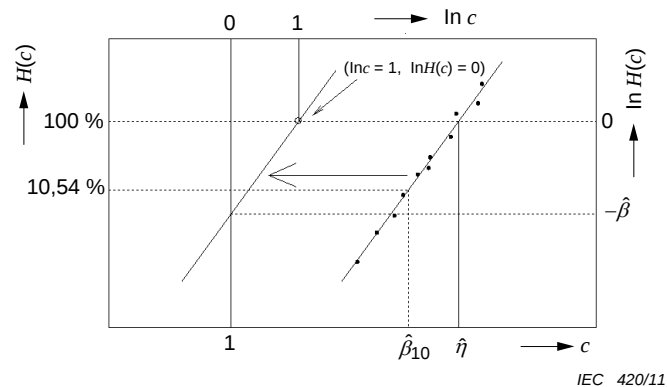


Figure A.4 – Estimation of distribution parameters

- 2) The point estimate of the scale parameter, $\hat{\eta}$

$\hat{\eta}$ is derived directly from the cross point of the original plotted line and a horizontal line through $H(c) = 100\%$ (or $F(c) = 63,2\%$) as shown in Figure A.4.

- 3) The point estimate of mean cycles to failure (MCTF), $\hat{m}$

$\hat{m}$ is given by the following expression:

$$\text{MCTF} = \hat{m} = \hat{\eta} \times \Gamma(1+1/\hat{\beta}) \quad (\text{A.14})$$

with $\hat{\eta}$ taken from step 2 above, and the gamma function value (Γ as defined e.g. in 2.56 of ISO 3534-1:2006) obtained with a handy scientific calculator or a convenient gamma functional table, respectively (see Annex D).

- 4) The point estimate of standard deviation, $\hat{\sigma}$

$\hat{\sigma}$ is given by the following expression:

$$\hat{\sigma} = \hat{\eta} \times \sqrt{\Gamma(1+2/\hat{\beta}) - \Gamma^2(1+1/\hat{\beta})} \quad (\text{A.15})$$

Where $\hat{\eta}$ and the gamma function value are obtained in the same way as mentioned under step 3 above.

- 5) The point estimate of the fractile (10 %) of the cycles to failure, B_{10}

B_{10} is derived directly from the cross point of the original plotted straight line and a horizontal line through $F(c) = 10\%$ in the Weibull plot or $H(c) = -\ln 0,9 = 10,54\%$ in the hazard plot as shown in Figure A.4.

A.5.1.5 Mixture of several failure modes

The Weibull probability plot or a hazard plot can result in a “dogleg curve”.

If the line is not straight, it is called “Dogleg Weibull”. This is caused by a mixture of more than one failure mode, i.e. usually competitive failure modes.

When this occurs, a close examination of the failed items is the best way to separate the data into different failure modes.

Suppose there is a data set of two kinds of failure modes (A and B). The first set should be analyzed as A mode data only, suspending the B mode data. Consequently, the second set would contain B mode data. These two sets of data can be used to predict the failure distribution.

If this is done correctly, plotting the two separate data sets will result in straight lines. A detailed description is shown in Annex G of IEC 61649:2008. In particular, it has to be noted that at least 10 failures are required for each failure mode.

A.5.2 Numerical methods

A.5.2.1 Distribution parameters

Whereas the graphical method described in A.5.1 above applies to complete, single censored, or multiple censored data, the numerical method of this subclause does not deal with multiple censored data.

The estimate for the two parameters of the Weibull distribution is obtained by numerically solving the equations below. The value of β that satisfies the first equation is the maximum likelihood estimation (MLE) of β . This value is used in the second equation to derive the MLE of η .

NOTE 1 Any appropriate computer routine to solve equations can be used to obtain β from the first equation, as the convergence to a single value is usually very fast.

NOTE 2 Refer to IEC 61649 for interval estimation, lower limit, etc. of β and η . For the meaning of $\beta <, =, >$ see Clause 8 of IEC 61649:2008.

Step 1 – Find the value of β that satisfies the equation below. The solution to this equation is the point estimate of the Weibull shape parameter $\hat{\beta}$.

$$\left[\frac{\sum_{i=1}^r c_i^\beta \ln(c_i) + (n-r)C^\beta \ln(C)}{\sum_{i=1}^r c_i^\beta + (n-r)C^\beta} - \frac{1}{\beta} \right] - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln(c_i) = 0 \quad (\text{A.16})$$

where

n is the number of tested items;

r is the number of failed items ($i=1,2,\dots,r$ and $r \leq n$);

C is the number of cycles when the test was stopped ($0 < c_i \leq C$).

Step 2 – Compute $\hat{\eta}$ using the value of $\hat{\beta}$, obtained in step 1, from:

$$\hat{\eta} = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r c_i^{\hat{\beta}} + (n-r)C^{\hat{\beta}} \right] \right\}^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \quad (\text{A.17})$$

A.5.2.2 Characteristics

A.5.2.2.1 Point estimate of mean cycles to failure MCTF, $\hat{m}$

$\hat{m}$ is calculated as:

$$\hat{m} = \hat{\eta} \Gamma(1 + 1/\hat{\beta}) \quad (\text{A.18})$$

where $\hat{\beta}$ and $\hat{\eta}$ are obtained from steps 1 and 2 in A.5.2.1 and the gamma function value Γ is defined in 2.56 of ISO 3534-1:2006. Alternatively, a suitable gamma function table may be used (see Annex D).

A.5.2.2.2 Standard deviation, $\hat{\sigma}$

$\hat{\sigma}$ is calculated as:

$$\hat{\sigma} = \hat{\eta} \times \sqrt{\Gamma(1 + 2/\hat{\beta}) - \Gamma^2(1 + 1/\hat{\beta})} \quad (\text{A.19})$$

A.5.2.2.3 Point estimate of the fractile (10 %) of cycles to failure, $\hat{B}_{10}$

$\hat{B}_{10}$ is calculated as:

$$\hat{B}_{10} = \hat{\eta} \left[\ln \left(\frac{1}{0,9} \right) \right]^{1/\hat{\beta}} \quad (\text{A.20})$$

A.5.2.2.4 Point estimate of the reliability at cycle c

The calculation and indication of the relay reliability at cycle c is optional.

The point estimate of the reliability at cycle c is calculated as:

$$\hat{R}(c) = \exp \left[- (c/\hat{\eta})^{\hat{\beta}} \right] \quad (\text{A.21})$$

Annex B (informative)

Example of numerical and graphical Weibull analysis

B.1 General

This example is taken from Annex B of IEC 61649:2008 and adapted to the modifications necessary for elementary relays as indicated in Clause A.1 of this standard. It is provided as a numerical test case to verify the accuracy of computer programmes implementing the procedures of this standard. In order to demonstrate coherence with the graphical method for Weibull analysis, the given data are also plotted on Weibull probability paper.

Forty items are put under test. The test is stopped at the time of the 20th failure. The following are the number of cycles ($\times 10^3$) corresponding to the first 20 failures:

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}	t_{19}	t_{20}
5	10	17	32	32	33	34	36	54	55	55	58	58	61	64	65	65	66	67	68

Applying the numerical procedures of this standard yields the following results:

B.2 Distribution parameters

The maximum likelihood estimate (MLE) values for β and η are:

$$\hat{\beta} = 2,091 \text{ and } \hat{\eta} = 84 \times 10^3$$

B.3 Mean cycles to failure (MCTF)

The point estimate of the mean cycles to failure m is:

$$\hat{m} = 74,39 \times 10^3$$

B.4 Value of $\hat{B}_{10}$

The point estimate of B_{10} , the time (in number of cycles) by which 10 % of the population will have failed is:

$$\hat{B}_{10} = 28,63 \times 10^3$$

B.5 Mean time to failure (MTTF)

Only where an estimate of the number of cycles per unit of time appropriate to a specific end use is known, then a mean time to failure (MTTF) for the relay can be determined.

Example: If the number of cycles per unit of time is equal to 100 cycles per day and the relay MCTF value is $74,39 \times 10^3$, the MTTF for the relay in this application can be calculated as follows:

$$\text{MTTF} = \text{MCTF} / \text{Number of cycles per unit of time} = 74,39 \times 10^3 / 100 = 743,9 \text{ days}$$

B.6 Graphical method (Weibull probability plot)

For the ranking of data, the same failure times (in number of cycles) as given above for the first 20 failures are taken.

According to A.5.1.2.1 the values for $F(c_i)$ are calculated using Benard's approximation, see Table B.1.

Table B.1 – Ranked failure data

Order number i	Failure time c_i [$\times 10^3$ cycles]	Median rank $F(c_i)$ [%]
1	5	1,75
2	10	4,2
3	17	6,7
4	32	9,2
5	32	11,6
6	33	14,1
7	34	16,6
8	36	19,1
9	54	21,5
10	55	24,0
11	55	26,5
12	58	29,0
13	58	31,4
14	61	33,9
15	64	36,4
16	65	38,9
17	65	41,3
18	66	43,8
19	67	46,3
20	68	48,8

The coordinates $(c_i, F(c_i))$ of each failure are plotted on the Weibull probability paper, see Figure B.1.

In order to show consistency between the numerical and graphical methods, the original straight line is drawn with the values of the distribution parameters obtained from the numerical method (see B.2 above):

$$\hat{\beta} = 2,091 \text{ and } \hat{\eta} = 84 \times 10^3$$

This can be verified using the procedures described in A.5.1.4, see also Figure A.4.

From the cross point of the original plotted line and a horizontal line at $F(c) = 10 \%$, the value for B_{10} is estimated as $\hat{B}_{10} = 28 \times 10^3$ cycles, in line with the numerical result of B.4.

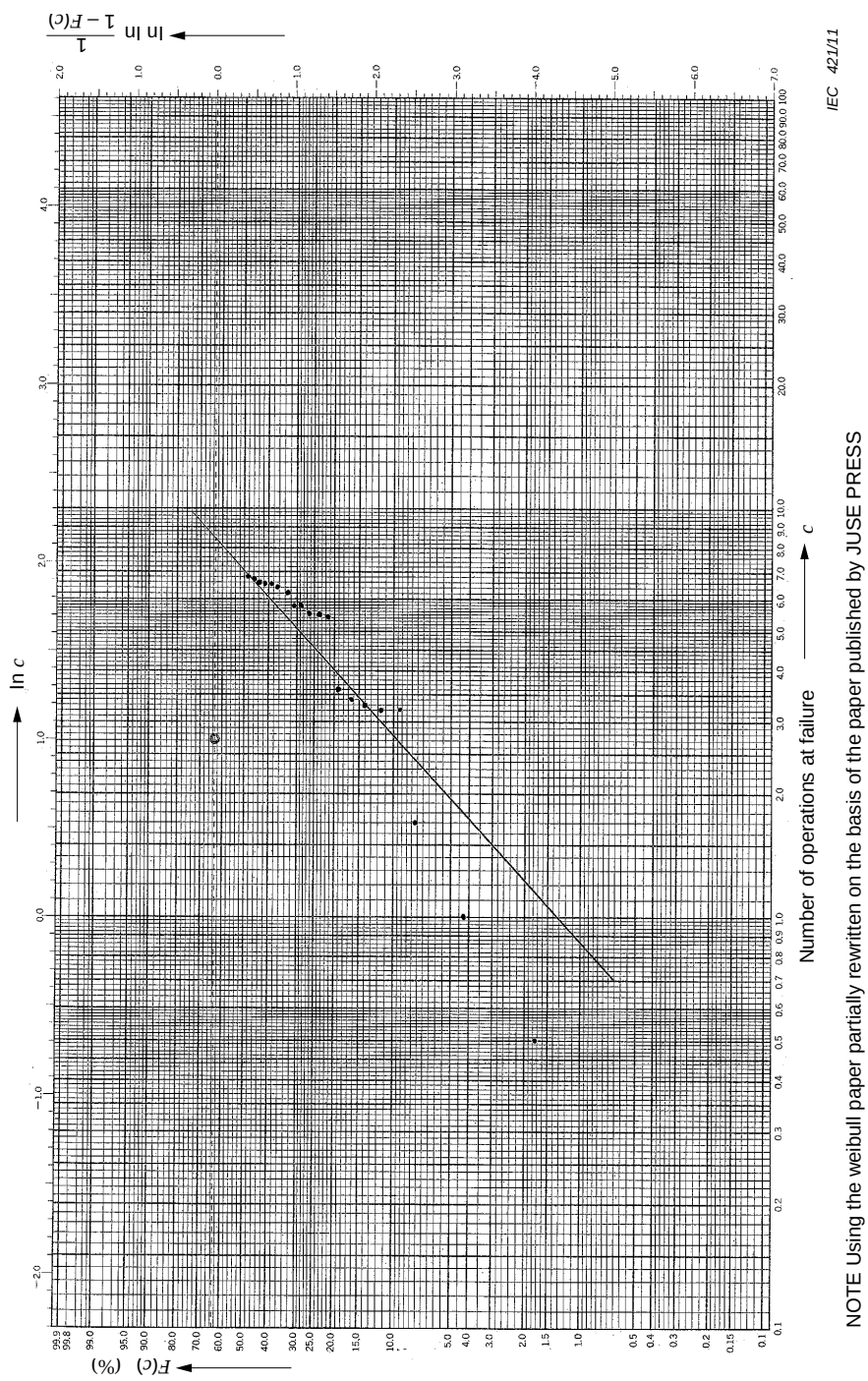


Figure B.1 – Weibull probability chart for the example

The plot shows a mixture of two failure modes, a low slope followed by a steep slope. Although the numerical method yields acceptable results, further analysis (see A.5.1.5) would be recommended. This illustrates the merit of plotting the data, not relying entirely on analytical methods.

Annex C (informative)

Example of cumulative hazard plot

C.1 General

This concrete example is provided to demonstrate the procedure of cumulative hazard plot when applied to a life test analysis of elementary relays. The procedure is aligned with the provisions of Annex A. This annex takes up an example of incomplete data with two failure modes. The cumulative hazard plot procedure provides estimations of distribution parameters and reliability characteristics from a plot, and using a simple scientific calculator or tables for the gamma function.

In this example multiple censored data are used. Therefore, the numerical equations for the distribution parameters given in A.5.2 are not applicable.

NOTE The current edition of IEC 61649 does not cover this case either.

Consequently only the graphical evaluation is described in this annex, whereas the numerical estimation is omitted.

C.2 Procedure of cumulative hazard plot

C.2.1 General

This clause describes a procedure to estimate parameters of a Weibull distribution and reliability characteristics of the data, using cumulative hazard paper.

C.2.2 Ranking and plotting

Observed data are ranked and plotted in steps 1 to 6. It is recommended to use a work sheet illustrated in Table C.1 for plotting.

Table C.1 – Work sheet for cumulative hazard analysis

Sample No.	Rank	Reverse rank	Cycles (c_i)	Failure mode	Hazard value	Cumulative hazard value ($H_j\%$)	
	i	$Ki=n-i+1$		M_j	$h \%$	$M1$	$M2$

Step 1

The ranking, i and the reverse ranking, K_i are entered in the respective columns. The value of K_i is calculated as follows:

$$K_i = n + 1 - i$$

where

n is the number of tested items.

Step 2

Observed data are sorted from smallest to largest in order of cycles to failure, with the values for cycles to failure (c_i , corresponding to i) filled in. The individual sample number is also entered in the column “No.”, corresponding to c_i .

Step 3

The hazard values, $h(c_i)$ are filled into the respective column corresponding to c_i and are calculated as follows:

$$h(c_i) = 1 / K_i \times 100(\%)$$

Step 4

If multiple failure modes appear, failure mode numbers are filled in the column of M_j corresponding to c_i . Here, j is the code number of a specific failure mode.

Step 5

Cumulative hazard values $H_j(c_i)$ are filled in the respective column and each value is calculated according to the same failure mode (M_j) as follows:

$$H_j(c_i) = \sum_{l \geq 1} h(c_l)$$

NOTE See Table C.2 for an example.

Step 6

Data points corresponding to (c_i , $H_j(c_i)$) are plotted in a cumulative hazard chart. Then a straight line is drawn through the data points of each failure mode that best fits the data.

Step 7

If the distribution of data points is close to the straight line, proceed to C.2.3, as the result seems to be aligned with a Weibull distribution, $\gamma = 0$.

If it is difficult to draw the straight line, it might be better to review the failure modes and to carry out a detailed failure diagnosis of the relays used for the test, or to re-assess the test conditions, etc.

C.2.3 Estimation of distribution parameters

Shape and scale parameters are derived from the plotting paper as follows:

- 1) The point estimate of the shape parameter, $\hat{\beta}$

A parallel line is drawn above the original plotted line, through the coordinate point ($\ln c = 1$, $\ln H(c) = 0$). The ordinate value of this point is equivalent to $H(c) = 100\%$ (or $F(c) = 63,2\%$).

$\hat{\beta}$ is read from the value of $\ln H(c)$ corresponding to the cross point of this parallel line and a vertical line through $\ln c = 0$, as shown in Figure C.1.

- 2) The point estimate of the scale parameter, $\hat{\eta}$

$\hat{\eta}$ is derived directly from the cross point of the original plotted line and a horizontal line through $H(c) = 100\%$ (or $F(c) = 63,2\%$) as shown in Figure C.1.

C.2.4 Estimation of distribution characteristics

The estimated values of the mean cycles to failure (MCTF) $\hat{m}$, the standard deviation $\hat{\sigma}$ and the fractile (10 %) of cycles to failure $\hat{B}_{10}$ are obtained as follows:

- 1) The point estimate of the mean cycles to failure (MCTF), $\hat{m}$

$\hat{m}$ is obtained from equation (A.14) with the values of $\hat{\eta}$ and $\hat{\beta}$ from C.2.3 above and the gamma function value determined with a convenient scientific calculator or a suitable gamma function table.

- 2) The point estimate of the standard deviation, $\hat{\sigma}$

$\hat{\sigma}$ is obtained in the same way from equation (A.15).

- 3) The point estimate of the fractile (10 %) of cycles to failure, $\hat{B}_{10}$

$\hat{B}_{10}$ can be read from the value of c at the cross point of the original plotted line and a horizontal line through $H(c) = 10,54\%$, as shown in Figure C.1.

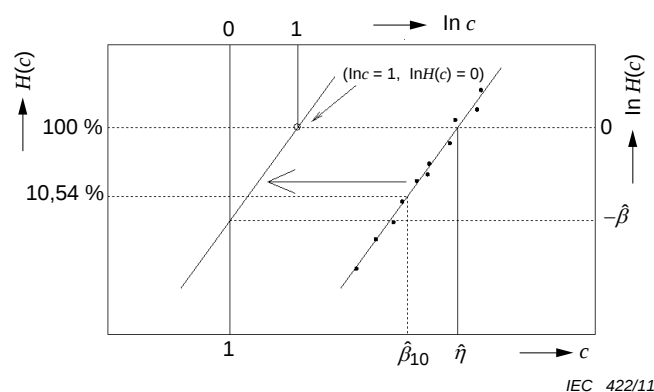


Figure C.1 – Estimation of distribution parameters

C.3 Example applied to life test data

C.3.1 General

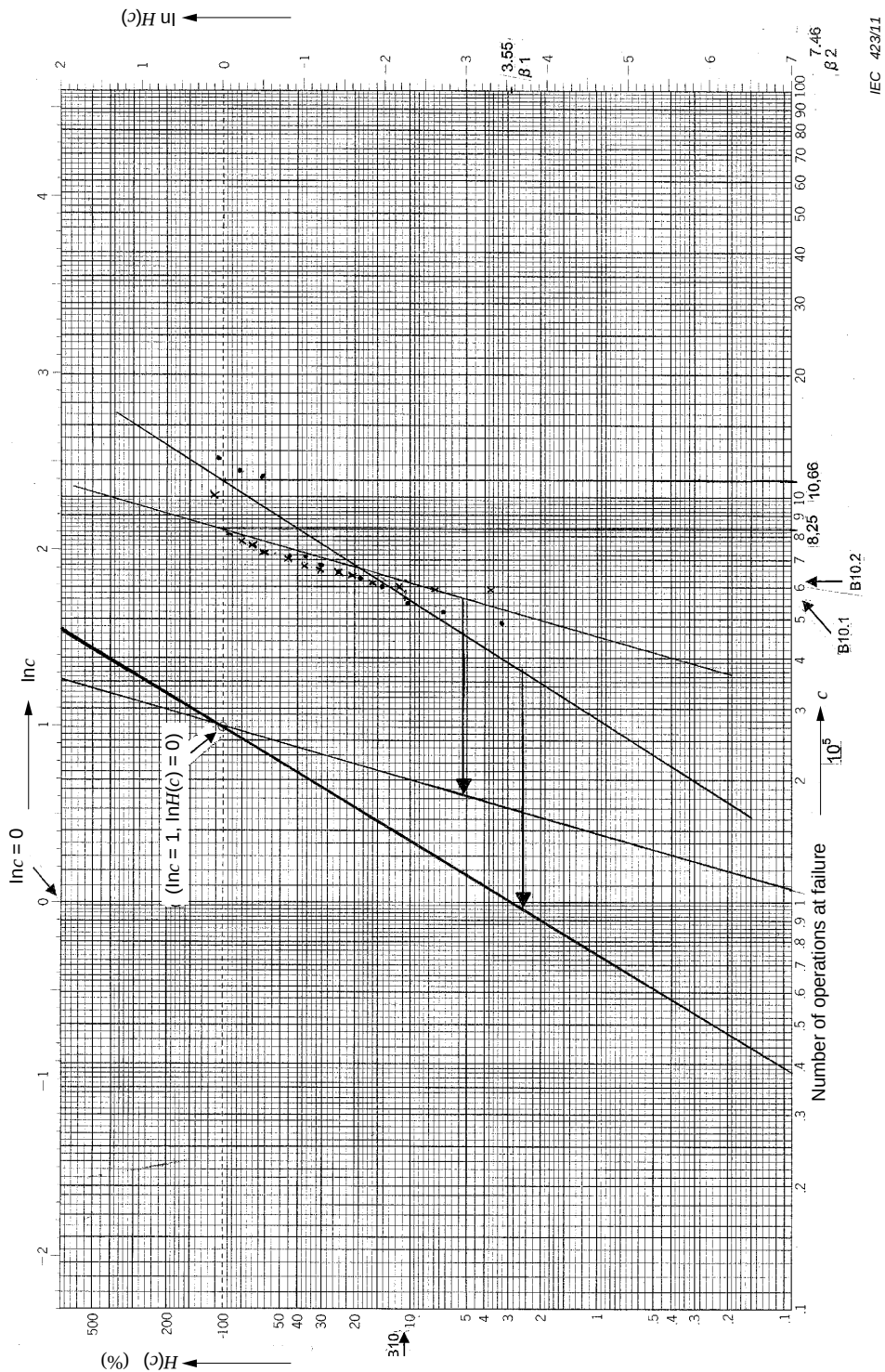
This example is provided to demonstrate the usefulness of reliability analysis by Weibull hazard plot based on life tests of elementary relays. Thirty items are put under test. The test is censored (truncated) at 1 240 000 cycles. The majority of items fail because of welding (failure mode 1) or erosion of contacts (failure mode 2).

C.3.2 Ranking and plotting

The application of the procedure from step 1 to step 6 of C.2.2 for the work sheet and the hazard plot yields Table C.2 and Figure C.2.

Table C.2 – Example work sheet

Sample No.	Rank	Reverse rank	KCycles(c_i)	Failure mode	Hazard value	Cumulative hazard value ($H_j\%$)	
	i	$Ki=n-i+1$		M_j	$h\%$	$M1$	$M2$
12	1	30	490	1	3,333	3,333	-
27	2	29	520	1	3,448	6,782	-
3	3	28	545	1	3,571	10,353	-
10	4	27	585	2	3,704	-	3,704
6	5	26	585	2	3,846	-	7,550
22	6	25	600	2	4,000	-	11,550
18	7	24	600	1	4,167	14,520	-
17	8	23	605	2	4,348	-	15,898
30	9	22	635	1	4,545	19,065	-
9	10	21	640	2	4,762	-	20,660
23	11	20	645	2	5,000	-	25,660
28	12	19	655	1	5,263	24,328	-
21	13	18	655	2	5,556	-	31,216
5	14	17	670	2	5,882	-	37,098
15	15	16	680	1	6,250	30,578	-
1	16	15	715	1	6,667	37,245	-
8	17	14	715	2	7,143	-	44,241
2	18	13	715	1	7,692	44,937	-
20	19	12	730	2	8,333	-	52,574
4	20	11	730	2	9,091	-	61,665
19	21	10	765	2	10,000	-	71,665
29	22	9	780	2	11,111	-	82,776
11	23	8	815	2	12,500	-	95,276
26	24	7	1 025	2	14,286	-	109,562
25	25	6	1 120	1	16,667	61,604	-
24	26	5	1 160	1	20,000	81,604	-
16	27	4	1 240	1	25,000	106,604	-
14	28	3	1 240	C	-	-	-
7	29	2	1 240	C	-	-	-
13	30	1	1 240	C	-	-	-
Mode 1 = Welding Mode 2 = Contact erosion C = Censored							



NOTE Using the hazard paper partially rewritten on the basis of the paper published by JUSE PRESS

Figure C.2 – Cumulative hazard plots

Distribution of this sample is a “dogleg” Weibull type. Data points corresponding to $(c_i, H_j(c_i))$ are plotted using filled circles (●) for welding failures (mode 1), and crosses (x) for contact erosion failures (mode 2).

C.3.3 Estimation of distribution parameters

Applying the procedures of C.2.3 yields the following results:

$$\hat{\beta}_1 = 3,55 \quad \hat{\eta}_1 = 1,066 \times 10^6$$

$$\hat{\beta}_2 = 7,46 \quad \hat{\eta}_2 = 8,25 \times 10^5$$

C.3.4 Estimation of distribution characteristics

Applying the procedures of C.2.4 yields the following results:

$$\hat{m}_1 = 9,60 \times 10^5 \quad \hat{\sigma}_1 = 2,83 \times 10^5 \quad \hat{B}_{10,1} = 5,60 \times 10^5$$

$$\hat{m}_2 = 7,74 \times 10^5 \quad \hat{\sigma}_2 = 1,22 \times 10^5 \quad \hat{B}_{10,2} = 6,10 \times 10^5$$

C.4 Reference document

H. Shiomi, T. Mitsuhashi, M. Saito, A Masuda, *How to use probability paper in reliability*, 1983 (only available in Japanese)

Annex D (informative)

Gamma function

The gamma function is defined in 2.56 of ISO 3534-1:2006.

Table D.1 gives the value of $\Gamma(1+1/k)$ as a function of k . For k values not listed in this table, a linear interpolation is acceptable.

Table D.1 – Values of the gamma function

k	$\Gamma(1+1/k)$	k	$\Gamma(1+1/k)$	k	$\Gamma(1+1/k)$
0,20	120	1,50	0,902 7	3,60	0,901 1
0,25	24	1,55	0,899 4	3,70	0,902 4
0,30	9,260 3	1,60	0,896 6	3,80	0,903 8
0,35	5,029 5	1,65	0,894 2	3,90	0,905 1
0,40	3,323 3	1,70	0,892 2	4,00	0,906 4
0,45	2,505 5	1,75	0,890 6	4,10	0,907 6
0,50	2,000 0	1,80	0,889 2	4,20	0,908 9
0,55	1,702 4	1,85	0,888 2	4,30	0,910 1
0,60	1,504 5	1,90	0,887 4	4,40	0,911 3
0,65	1,360 3	1,95	0,886 7	4,50	0,912 5
0,70	1,265 7	2,00	0,886 2	4,60	0,913 7
0,75	1,190 6	2,10	0,885 7	4,70	0,914 9
0,80	1,133 0	2,20	0,885 6	4,80	0,916 0
0,85	1,087 8	2,30	0,885 9	4,90	0,917 1
0,90	1,052 2	2,40	0,886 5	5,00	0,918 2
0,95	1,023 8	2,50	0,887 2	5,20	0,920 2
1,00	1,000 0	2,60	0,888 2	5,40	0,922 2
1,05	0,980 8	2,70	0,889 3	5,60	0,924 1
1,10	0,964 9	2,80	0,890 3	5,80	0,926 0
1,15	0,951 7	2,90	0,891 7	6,00	0,927 7
1,20	0,940 6	3,00	0,893 0	6,20	0,929 3
1,25	0,931 4	3,10	0,894 3	6,40	0,930 9
1,30	0,923 6	3,20	0,895 6	6,60	0,932 5
1,35	0,916 9	3,30	0,897 0	6,80	0,934 0
1,40	0,911 4	3,40	0,898 4	7,00	0,935 4
1,45	0,906 7	3,50	0,899 7	8,00	0,941 7

Bibliography

ISO 3534 (all parts), *Statistics – Vocabulary and symbols*

ISO 3534-1:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	35
INTRODUCTION.....	37
1 Domaine d'application	38
2 Références normatives.....	38
3 Termes et définitions	39
4 Généralités.....	41
5 Conditions d'essai	42
5.1 Entités d'essai.....	42
5.2 Conditions liées à l'environnement	43
5.3 Conditions de fonctionnement	43
5.4 Appareillage d'essai	43
6 Critères de défaillance.....	43
7 Données de sortie	44
8 Analyse des données de sortie	44
9 Présentation des mesures de fiabilité	44
Annexe A (normative) Analyse de données	46
Annexe B (informative) Exemple d'analyse numérique et graphique de Weibull	55
Annexe C (informative) Exemple de tracé de danger cumulatif.....	60
Annexe D (informative) Fonction gamma	67
Bibliographie.....	68
Figure A.1 – Exemple de papier de probabilité de Weibull.....	49
Figure A.2 – Exemple de papier de tracé de danger cumulatif.....	51
Figure A.3 – Tracé des points de données et dessin d'une ligne droite	51
Figure A.4 – Estimation des paramètres de distribution.....	52
Figure B.1 – Diagramme de la probabilité de Weibull pour l'exemple	58
Figure C.1 – Estimation des paramètres de distribution	63
Figure C.2 – Tracés de danger cumulatif	65
Tableau B.1 – Données de défaillance classées	56
Tableau C.1 – Feuille de calcul pour l'analyse de danger cumulatif.....	60
Tableau C.2 – Exemple de feuille de calcul.....	63
Tableau D.1 – Valeurs de la fonction gamma.....	67

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RELAIS ÉLECTROMÉCANIQUES ÉLÉMENTAIRES –

Partie 2: Fiabilité

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 61810-2 a été établie par le comité d'études 94 de la CEI: Relais électriques de tout-ou-rien.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2005, dont elle constitue une révision technique.

Les principales modifications portant sur cette précédente édition sont énumérées ci-dessous:

- inclusion de méthodes numériques et graphiques pour l'évaluation de Weibull;
- établissement d'une cohérence complète avec la deuxième édition de la norme de fiabilité de base CEI 61649;
- suppression des anciennes Annexe A et Annexe D, ces deux annexes étant contenues dans la CEI 61810-1.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
94/316/FDIS	94/325/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.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61810, sous le titre général *Relais électromécaniques élémentaires*, est disponible sur le site web de la CEI.

Cette Norme internationale doit être utilisée conjointement avec la CEI 61649:2008.

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.

INTRODUCTION

Dans le cadre de la série CEI 61810 de normes de base couvrant les relais électromécaniques élémentaires, la CEI 61810-2 est destinée à fournir des exigences et des essais permettant l'évaluation de la fiabilité des relais. Toutes les informations concernant les essais d'endurance pour les essais de type ont été incluses dans la CEI 61810-1.

NOTE Selon la CEI 61810-1, une valeur spécifiée de l'endurance électrique dans des conditions spécifiques (par exemple, charge de contact) est vérifiée en soumettant à essai 3 relais. Aucun n'est autorisé à présenter une défaillance. Dans la présente norme CEI 61810-2, une prédiction de la fiabilité d'un relais est réalisée en utilisant une évaluation statistique des cycles de fonctionnement mesurés avant défaillance d'un plus grand nombre de relais (généralement 10 relais ou plus).

Le comité d'études responsable de la sûreté de fonctionnement (CE 56) a récemment élaboré une nouvelle édition de la CEI 61649 tenant compte des données d'essai suivant la distribution de Weibull. Cette deuxième édition contient des méthodes à la fois numériques et graphiques pour l'évaluation des données suivant la distribution de Weibull.

La CEI 61810-2 a été élaborée en se basant sur cette norme de fiabilité de base. Elle comprend les conditions d'essai et une méthode d'évaluation pour obtenir les mesures de fiabilité correspondantes pour les relais électromécaniques élémentaires. La durée de vie des relais en tant qu'entités non réparables est essentiellement déterminée par le nombre de manœuvres. C'est pourquoi la fiabilité est exprimée en termes de MCTF (cycles moyens de fonctionnement avant défaillance).

Communément, la fiabilité de l'équipement est calculée à partir des chiffres de la MTTF (durée moyenne de fonctionnement avant défaillance). En ayant connaissance de la fréquence de fonctionnement (cadence du cycle de fonctionnement) du relais au sein de l'équipement, il est possible de calculer une valeur de MTTF efficace pour le relais dans cette application.

De telles valeurs de MTTF calculées pour les relais peuvent être utilisées pour calculer la fiabilité respective, la probabilité de défaillance, et les valeurs de disponibilité (comme le MTBF (temps moyen entre défaillances)) pour l'équipement dans lequel sont incorporés ces relais.

Il n'est généralement pas approprié d'indiquer qu'une valeur de MCTF spécifique est « haute » ou « basse ». Les chiffres des MCTF sont utilisés pour réaliser des évaluations comparatives entre les relais avec différents styles de conception ou de construction, et d'indication de la fiabilité de produit dans des conditions spécifiques.

RELAIS ÉLECTROMÉCANIQUES ÉLÉMENTAIRES –

Partie 2: Fiabilité

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61810 couvre les conditions d'essai et les dispositions pour l'évaluation des essais d'endurance utilisant les méthodes statistiques appropriées pour obtenir les caractéristiques de fiabilité pour relais. Il convient de l'utiliser conjointement avec la CEI 61649.

La présente Norme internationale s'applique aux relais électromécaniques élémentaires considérés comme des entités non réparées (c'est-à-dire des entités qui ne sont pas réparées après défaillance), lorsqu'un échantillon aléatoire d'entités est soumis à un essai de cycles de fonctionnement avant défaillance (CTF).

La durée de vie d'un relais est habituellement exprimée en nombre de cycles. De ce fait, toutes les fois que les termes « temps » ou « durée » sont utilisés dans la CEI 61649, il convient de comprendre ce terme comme « cycles ». Cependant, avec une fréquence donnée de fonctionnement, le nombre de cycles peut être transformé en temps respectifs (comme les durées de fonctionnement avant défaillance (TTF)).

Les critères de défaillance et les caractéristiques résultantes des relais élémentaires décrivant leur fiabilité en utilisation normale sont spécifiés dans la présente norme. Une défaillance de relais se produit lorsque les critères de défaillance spécifiés sont satisfaits.

Comme le taux de défaillance pour les relais élémentaires ne peut pas être considéré comme constant, en particulier du fait des mécanismes d'usure, les durées de fonctionnement avant défaillance des entités essayées montrent généralement une distribution de Weibull. La présente norme fournit des méthodes à la fois numériques et graphiques pour calculer des valeurs approchées pour la distribution de Weibull pour deux paramètres, ainsi que les limites de confiance inférieures.

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 60050-191:1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 191: Sûreté de fonctionnement et qualité de service*

CEI 60050-444:2002, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 444: Relais élémentaires*

CEI 60300-3-5:2001, *Gestion de la sûreté de fonctionnement – Partie 3-5: Guide d'application – Conditions des essais de fiabilité et principes des essais statistiques*

CEI 61649:2008, *Analyse de Weibull*

CEI 61810-1:2008, *Electromechanical elementary relays – Part 1: General requirements* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050-191 et la CEI 60050-444, dont certains sont reproduits ci-dessous, ainsi que ceux figurant ci-après s'appliquent.

3.1

entité

tout composant que l'on peut considérer individuellement

[CEI 60050-191:1990, 191-01-01, modifié]

NOTE Dans le cadre de la présente norme, les entités sont des relais élémentaires.

3.2

entité non réparée

entité qui n'est pas réparée après défaillance

[CEI 60050-191:1990, 191-01-03, modifié]

3.3

manœuvre

passage à l'état de travail, suivi du passage à l'état de repos

[CEI 60050-444:2002, 444-02-11]

3.4

fréquence de fonctionnement

nombre de manœuvres par unité de temps

[CEI 60050-444:2002, 444-02-12]

3.5

fiabilité

capacité d'une entité à réaliser une fonction requise dans des conditions données pour un nombre donné de cycles ou un intervalle de temps

[CEI 60050-191:1990, 191-02-06, modifié]

NOTE 1 On suppose généralement que l'entité est en état d'exécuter cette fonction requise au début de l'intervalle de temps.

NOTE 2 Le terme « fiabilité » est également utilisé comme une mesure de la fiabilité (voir CEI 60050-191:1990, 191-12-01).

3.6

essai de fiabilité

expérience réalisée dans le but de mesurer, de quantifier ou de classer une mesure ou une caractéristique de la fiabilité d'une entité

[CEI 60300-3-5:2001, 3.1.27]

3.7

essai de durée de vie

essai destiné à estimer, vérifier ou comparer la durée de vie de la classe d'entités soumises à essai

[CEI 60300-3-5:2001, 3.1.17, modifié]

3.8
cycles de fonctionnement avant défaillance

CTF¹

nombre total de cycles d'une entité, depuis la première mise en état de fonctionnement jusqu'à l'apparition d'une défaillance

3.9
cycles moyens de fonctionnement avant défaillance

MCTF²

espérance mathématique du nombre de cycles avant défaillance

3.10
durée de fonctionnement avant défaillance

TTF³

durée cumulée des temps de fonctionnement d'une entité depuis la première mise en état de fonctionnement jusqu'à l'apparition d'une défaillance

[CEI 60050-191:1990, 191-10-02, modifié]

3.11
durée moyenne de fonctionnement avant défaillance

MTTF⁴

espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance

[CEI 60050-191:1990, 191-12-07]

3.12
vie utile

nombre de cycles ou durée des temps jusqu'à ce qu'un certain pourcentage d'entités ait subi une défaillance

NOTE Dans la présente norme, la valeur de ce pourcentage est de 10 %.

3.13
défaillance

cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise

[CEI 60050-191:1990, 191-04-01, modifié]

3.14
dysfonctionnement

événement unique se traduisant par une entité ne réalisant pas une fonction requise

3.15
défaillance de contact

apparition de dysfonctionnements de repos et/ou de travail d'un contact en essai, dépassant un nombre spécifié

3.16
critères de défaillances

ensemble de règles utilisées de définir si un événement observé constitue une défaillance

[CEI 60300-3-5:2001, 3.1.10]

¹ CTF = *Cycles To Failure*.

² MCTF = *Mean Cycles To Failure*.

³ TTF = *Time To Failure*.

⁴ MTTF = *Mean Time To Failure*.

3.17

catégorie de charge de contact

classification de contacts de relais en fonction des mécanismes d'usure

NOTE Diverses catégories de contact sont définies dans la CEI 61810-1.

4 Généralités

Les dispositions de la présente partie de la CEI 61810 sont fondées sur les publications correspondantes relatives à la sûreté de fonctionnement. En particulier, les documents suivants ont été pris en compte: la CEI 60050-191, la CEI 60300-3-5 et la CEI 61649.

Le but des essais de fiabilité contenus dans la présente norme est d'obtenir des données objectives et reproductibles sur la fiabilité des relais élémentaires représentatifs de la qualité de production normalisée. Les essais décrits et les outils statistiques correspondants pour obtenir des mesures de fiabilité fondées sur les résultats d'essai peuvent être utilisés pour l'estimation de telles mesures de fiabilité, ainsi que pour la vérification des mesures indiquées.

NOTE 1 Des exemples d'application de mesures de fiabilité sont:

- l'établissement de mesures de fiabilité pour un nouveau type de relais;
- la comparaison de relais ayant des caractéristiques similaires, mais produits par des fabricants différents;
- l'évaluation de l'influence sur un relais de différents matériaux ou de différentes solutions de fabrication;
- la comparaison d'un nouveau relais avec un relais qui a déjà fonctionné pendant une période de temps spécifique;
- le calcul de la fiabilité d'un équipement ou d'un système incorporant un ou plusieurs relais.

Selon les Articles 8 et 9 de la CEI 60300-3-5, pour des entités non réparées présentant un taux non constant de défaillances, le modèle de Weibull est l'outil statistique le plus approprié pour l'évaluation des mesures de fiabilité. Cette procédure d'analyse est décrite dans la CEI 61649.

Les relais élémentaires dans le domaine d'application de la présente norme sont considérés comme des entités non réparées. Ils ne présentent généralement pas un taux de défaillance constant mais un taux de défaillance en augmentation avec le temps, étant donné qu'ils sont essayés jusqu'à ce que les mécanismes d'usure deviennent prédominants. Les cycles de fonctionnement avant défaillance d'un échantillon aléatoire des entités essayées présentent généralement une distribution de Weibull.

NOTE 2 Si aucun mécanisme d'usure ne prédomine, on peut supposer des défaillances aléatoires avec un taux de défaillance constant. Le paramètre de forme β de la distribution de Weibull est alors égal à 1 et la fonction de fiabilité devient la loi exponentielle bien connue. Pour les essais de relais où seules quelques défaillances mineures (ou même aucune défaillance) se produisent, l'approche de Weibayes de la CEI 61649 peut être appropriée. Une autre option peut être l'application de la méthode de la mort subite décrite à l'Article 13 de la CEI 61649.

Les procédures statistiques de la présente norme ne sont valables que lorsqu'au moins 10 défaillances correspondantes sont enregistrées.

Par accord spécial entre le fabricant et l'utilisateur, l'essai peut même être réalisé avec moins de 10 relais à condition que l'incertitude des paramètres de Weibull estimés soit acceptable entre ces parties. Dans ce cas, le nombre minimum de relais soumis à essai doit être spécifié; ce nombre remplace le nombre minimum de 10 relais à chaque fois que celui-ci est exigé dans la présente norme. On doit toutefois noter que cette réduction du nombre d'éprouvettes de relais n'est acceptable que lorsqu'on applique les méthodes graphiques du A.5.1. Pour la méthode numérique du A.5.2, au moins 10 défaillances sont requises, car l'estimation du maximum de vraisemblance (MLE) est une méthode de calcul pour des échantillons de plus grande taille, c'est-à-dire lorsqu'au moins 10 défaillances pertinentes sont enregistrées (voir 9.3 de la CEI 61649).

La première étape de l'analyse des cycles de fonctionnement enregistrés avant défaillance (CTF) des relais essayés est la détermination des deux paramètres de distribution de la distribution de Weibull. Dans une deuxième étape, les cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF) sont calculés comme une estimation ponctuelle. Dans une troisième étape, la vie utile est déterminée comme la limite de confiance inférieure du nombre de cycles auquel 10 % de la population de relais aura subi une défaillance (B_{10}).

Avec une fréquence donnée de fonctionnement, ces mesures de fiabilité exprimées en nombre de cycles (MCTF) peuvent être transformées en temps respectifs (MTTF), voir l'exemple de l'Annexe B.

Les procédures statistiques nécessitent certaines installations informatiques appropriées. Le logiciel pour l'évaluation des données suivant la distribution de Weibull est disponible à la vente sur le marché. Un tel logiciel peut être utilisé pour l'objet de la présente norme à condition qu'il présente des résultats équivalents lorsque les données fournies dans l'Annexe B sont utilisées.

Étant donné que le nombre de cycles de fonctionnement avant défaillance dépend largement de l'ensemble spécifique de conditions d'essai (en particulier la charge électrique des contacts de relais), les valeurs pour la MCTF et la vie utile issues des données d'essai s'appliquent uniquement à cet ensemble de conditions d'essai, qui doivent être indiquées par le fabricant ainsi que les mesures de fiabilité.

5 Conditions d'essai

5.1 Entités d'essai

Étant donné qu'il est nécessaire d'enregistrer un minimum de 10 défaillances pour réaliser l'analyse décrite dans la présente norme, il convient de soumettre 10 entités ou plus (relais) à l'essai. Cela permet de tronquer l'essai lorsqu'au moins 10 relais ont subi une défaillance. Lorsque l'essai est interrompu à un nombre de cycles spécifiques, on peut considérer que tous les relais n'ayant pas encore présenté de défaillance présentent une défaillance pour ce nombre de cycles (hypothèse du cas le plus défavorable). Toutefois, au moins 70 % des relais essayés doivent physiquement présenter une défaillance. Ceci permet d'effectuer les essais avec 10 relais seulement, même lorsque l'essai est tronqué avant que tous les relais n'aient présenté physiquement une défaillance (avec un minimum de 7 défaillances physiques enregistrées).

Les échantillons doivent être sélectionnés de manière aléatoire à partir du même lot de production, et doivent être de type et de construction identiques. Aucune action n'est autorisée sur les entités d'essai à partir du temps d'échantillonnage jusqu'à ce que l'essai commence.

Lorsque toute procédure particulière de rodage ou de sélection de contrainte de fiabilité est employée par le fabricant avant l'échantillonnage, cela doit s'appliquer à toute la production. Le fabricant doit décrire et déclarer de telles procédures, ainsi que les résultats d'essai.

Sauf spécification contraire du fabricant, tous les contacts de chaque relais en essai doivent être chargés comme indiqué et continuellement surveillés pendant l'essai.

L'essai débute avec toutes les entités et est interrompu à un certain nombre de cycles. À cet instant, un certain nombre d'entités (minimum: 10 entités) a subi une défaillance. Le nombre de cycles de fonctionnement avant défaillance de chacune des entités ayant subi une défaillance est enregistré.

Les entités ayant subi une défaillance au cours de l'essai ne sont pas remplacées à la suite de cette défaillance.

5.2 Conditions liées à l'environnement

L'environnement d'essai doit être le même pour toutes les entités.

- Les entités doivent être montées comme pour un service normal; en particulier, les relais pour montage sur les cartes de circuits imprimés sont essayés en position horizontale, sauf spécification contraire.
- La température ambiante doit être celle qui est spécifiée par le fabricant.
- Sauf spécification contraire, toutes les autres grandeurs d'influence doivent être conformes aux valeurs et plages de tolérances données dans le Tableau 1 de la CEI 61810-1.

5.3 Conditions de fonctionnement

L'ensemble des conditions de fonctionnement

- tension(s) assignée(s) de bobines;
- suppression de bobine (le cas échéant);
- fréquence de fonctionnement;
- facteur d'utilisation;
- charge(s) de contact

doit correspondre aux précisions du fabricant.

Il convient que les valeurs recommandées soient choisies parmi celles figurant à l'Article 5 de la CEI 61810-1.

L'essai est réalisé sur chaque charge de contact et chaque matériau de contact comme spécifié par le fabricant.

Il convient de faire fonctionner pendant l'essai tous les dispositifs spécifiés (par exemple les circuits de protection ou de suppression), le cas échéant, qui font partie du relais ou sont indiqués par le fabricant comme étant nécessaires pour les charges de contacts.

Les contacts doivent être continuellement surveillés pour détecter les dysfonctionnements pour l'ouverture et les dysfonctionnements pour la fermeture ainsi que les chevauchements non prévus (fermeture simultanée du côté travail et du côté repos d'un contact à deux directions).

Les contacts sont connectés à la charge ou aux charges conformément au Tableau 12 de la CEI 61810-1 comme spécifié et indiqué par le fabricant.

5.4 Appareillage d'essai

Le circuit d'essai décrit à l'Annexe C de la CEI 61810-1 doit être utilisé, sauf spécification contraire du fabricant et indication explicite dans le rapport d'essai.

6 Critères de défaillance

Lorsque tout contact d'un relais en essai ne réussit pas à s'ouvrir ou ne réussit pas à se fermer ou présente un chevauchement non prévu, cela doit être considéré comme un dysfonctionnement.

Trois niveaux de sévérité sont spécifiés:

- sévérité A: le premier dysfonctionnement détecté est défini comme une défaillance;

- sévérité B: le sixième dysfonctionnement détecté ou deux dysfonctionnements consécutifs sont définis comme une défaillance;
- sévérité C: comme spécifié par le fabricant.

Le niveau de sévérité utilisé pour l'essai doit être tel que prescrit par le fabricant et indiqué dans le rapport d'essai.

7 Données de sortie

Les données à analyser sont constituées de cycles de fonctionnement avant défaillance (CTF) pour chacune des entités mises à l'essai. Ces valeurs de CTF doivent être connues de manière exacte. Cependant, il n'est pas nécessaire de rassembler les valeurs de CTF pour toutes les entités en essai, étant donné que l'essai peut être interrompu avant que toutes les entités n'aient subi une défaillance, à condition qu'au moins 10 valeurs de CTF d'entités différentes ayant subi une défaillance soient disponibles.

8 Analyse des données de sortie

L'évaluation des valeurs de CTF obtenues pendant l'essai doit être effectuée conformément aux procédures données dans l'Annexe A.

9 Présentation des mesures de fiabilité

Les mesures de fiabilité de base applicables à des relais élémentaires comme décrit dans la présente norme et obtenues à partir de l'analyse des données doivent être fournies.

Cependant, étant donné que les valeurs obtenues pour ces mesures de fiabilité utilisant les procédures de l'Annexe A dépendent dans une grande mesure des caractéristiques de conception de base du relais, des conditions d'essai de l'Article 5 et des critères de défaillance de l'Article 6, les informations suivantes doivent aussi être fournies avec les résultats d'essai :

- le type de relais pour lequel les résultats sont valables:
 - a) le matériau de contact;
 - b) les divergences par rapport aux types normalisés (le cas échéant);
 - c) le type de borne;
- ensemble de conditions de fonctionnement (voir 5.3):
 - a) tension(s) assignée(s) de bobines;
 - b) suppression de bobine (le cas échéant);
 - c) fréquence de fonctionnement;
 - d) facteur d'utilisation;
 - e) charge(s) de contact;
 - f) conditions ambiantes;
- schéma d'essai sélectionné (voir l'Article C.3 de la CEI 61810-1, ou détails des circuits d'essai, si différents du circuit décrit à l'Article C.1 de la CEI 61810-1);
- niveau de sévérité (voir l'Article 6).

De plus, les données fondamentales de l'essai et l'analyse correspondante (voir Annexe A) doivent être fournies dans le rapport d'essai:

- nombre d'entités (n) en essai;
- nombre d'entités défaillantes (r) enregistrées au cours de l'essai (minimum 10);
- temps (donné en nombre de cycles) lorsque l'essai a été interrompu (T);

- niveau de confiance, si autre que 90 %.

Les résultats d'essai sont applicables aux échantillons spécifiquement essayés et aux variantes telles que stipulées par le fabricant, à condition que les caractéristiques de conception correspondantes demeurent les mêmes.

NOTE Comme exemples acceptables on peut citer les variantes de bobines avec les mêmes ampère-spires. Comme exemples inacceptables, on peut citer des variantes avec des bobines à courant alternatif à la place du courant continu, ou des dynamiques de contact différentes.

Lorsque les résultats d'essai pour diverses conditions de fonctionnement (par exemple charges de contacts) sont disponibles, ils peuvent être compilés comme une famille de courbes ou dans des tableaux adaptés. Néanmoins, on doit s'assurer qu'un nombre suffisant de points est déterminé lors du tracé de telles courbes.

Annexe A (normative)

Analyse de données

A.1 Généralités

La présente annexe a été obtenue à partir de la norme de fiabilité CEI 61649:2008 avec certaines modifications nécessaires pour adopter les procédures aux relais élémentaires. La distribution considérée dans la norme de fiabilité est du type Weibull, qui a été reconnue empiriquement correspondre à une analyse de données appropriée pour les relais élémentaires.

La méthode graphique ainsi que la méthode numérique sont couvertes dans la CEI 61649. De plus, non seulement l'analyse de probabilité de Weibull mais également l'analyse de danger de Weibull sont considérées dans la méthode graphique. Les analyses de danger de Weibull et de probabilité de Weibull sont ici respectivement appliquées à des données complètes et incomplètes. Cette dernière est particulièrement utile pour l'analyse de fiabilité des relais, car un grand nombre d'ensembles de données obtenues à partir des essais de durée de vie sont incomplets (essais censurés).

NOTE 1 Les données incomplètes sont les ensembles de données obtenues à partir de l'essai après un certain nombre de défaillances ou un certain nombre de cycles, lorsque des entités fonctionnent toujours, tandis que les données complètes sont les ensembles de données sans censure.

Cette annexe traite le tracé de la probabilité de Weibull et le tracé du danger de Weibull pour la méthode graphique basée sur les principes de régression de rang médian (MRR) et l'estimation de maximum de vraisemblance (MLE) pour la méthode numérique conformément aux dispositions de la CEI 61649.

Lorsque des informations plus approfondies sont requises, la CEI 61649 doit être consultée.

La notion de « temps » fait référence à des « cycles » dans le cas de relais. Cependant, avec une fréquence donnée de fonctionnement, les valeurs indiquées en nombres de cycles peuvent être transformées en temps respectifs.

NOTE 2 Tandis que la variable « temps » (symbole: t) est utilisée dans la CEI 61649, la présente norme est basée sur la variable « cycles » (symbole: c).

Dans un souci de cohérence, les équations et symboles suivants sont reproduits conformément à la CEI 61649.

A.2 Abréviations

CDF⁵ Fonction de distribution cumulative

MRR⁶ Régression de rang médian

MLE⁷ Estimation du maximum de vraisemblance

MCTF Cycles moyens de fonctionnement avant défaillance

PDF⁸ Fonction de densité de probabilité

⁵ CDF = *Cumulative Distribution Function*.

⁶ MRR = *Medium Rank Regression*.

⁷ MLE = *Maximum Likelihood Estimation*.

A.3 Symboles et définitions

Les symboles suivants sont utilisés dans la présente Annexe A et à la fois dans l'Annexe B et l'Annexe C. Les fonctions et constantes auxiliaires sont définies dans le texte.

$f(c)$	fonction de densité de probabilité
$F(c)$	fonction de distribution cumulative (probabilité de défaillance)
$h(c)$	fonction de danger (ou taux de défaillance instantané)
$H(c)$	fonction de danger cumulatif
$R(c)$	fonction de fiabilité de la distribution de Weibull (probabilité de survie)
B_{10}	moment prévisible où 10 % de la population aura subi une défaillance (fractile de 10 % de la durée de vie)
c	cycle – variable
$\hat{m}$	cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF)
β	paramètre de forme de Weibull (indiquant la vitesse de variation du taux de défaillance instantané dans le temps)
η	paramètre d'échelle de Weibull ou durée de vie caractéristique (à laquelle 63,2 % des entités ont présenté une défaillance)
σ	écart type

A.4 Distribution de Weibull

Les formules fondamentales de Weibull sont définies comme suit.

NOTE Pour toute information complémentaire, il est fait référence à la CEI 61649.

La fonction de densité de probabilité (PDF) de la distribution de Weibull est:

$$f(c) = \beta \frac{c^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{c}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{A.1})$$

La fonction de distribution cumulative (CDF), ou défaillance de fraction attendue au cycle c est:

$$F(c) = 1 - e^{-(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.2})$$

La fonction de fiabilité $R(c)$, ou fraction attendue survivant au cycle c est:

$$R(c) = 1 - F(c) = e^{-(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.3})$$

La fonction de danger (ou taux de défaillance instantané) $h(c)$ est:

$$h(c) = \beta \frac{c^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (\text{A.4})$$

La fonction de danger cumulatif $H(c)$ est:

$$H(c) = \left(\frac{c}{\eta} \right)^\beta \quad (\text{A.5})$$

A.5 Procédure

A.5.1 Méthodes graphiques

A.5.1.1 Vue d'ensemble

Une analyse graphique est effectuée en traçant les données sur un papier de probabilité de Weibull conçu de manière appropriée, en ajustant une ligne droite entre les données et en estimant les paramètres de distribution (paramètre de forme et durée de vie caractéristique ou paramètre d'échelle). Les caractéristiques de fiabilité (à savoir, MCTF, valeur de B_{10} , et écart type) sont alors calculées.

Les méthodes graphiques profitent de traitements relativement directs et de la disponibilité des données avec un mélange de modes de défaillance. Les fondements de l'analyse et une vue d'ensemble des processus appliqués au tracé de probabilité de Weibull et de danger de Weibull sont indiqués dans cet article.

A.5.1.2 Tracé de probabilité de Weibull

A.5.1.2.1 Classement et tracé des positions

Pour réaliser le tracé de Weibull, classer les données du plus petit au plus grand nombre de cycles avant défaillance (c_i). Ce classement détermine les positions du tracé pour le cycle (c), l'axe et l'ordonnée, la fonction de distribution cumulative ($F(c)$), en pourcentages de valeurs

$F(c)$ est calculée par une régression de rang médian (MRR).

On peut obtenir une valeur approchée en utilisant l'approximation de Benard (voir 7.2.1 de la CEI 61649:2008):

$$F(c_i) = (i - 0,3) / (n + 0,4) \% \quad (\text{A.6})$$

où

n est le nombre d'entités soumises à essai;

i est la position classée de l'entité de donnée.

Les points de données de $(c_i, F(c_i))$ sont tracés sur le papier de tracé de probabilité de Weibull.

Pour les détails, voir 7.2.1 et 7.2.2 de la CEI 61649:2008.

A.5.1.2.2 Papier de tracé de probabilité de Weibull

La conception du papier de probabilité de Weibull est représentée ci-dessous.

L'équation (A.3) peut être réécrite en l'équation suivante:

$$\frac{1}{1 - F(c)} = e^{(c/\eta)^\beta} \quad (\text{A.7})$$

En considérant deux fois les logarithmes normaux des deux membres de l'équation (A.7) on obtient l'équation d'une droite comme représenté ci-dessous:

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(c)} = \beta \ln c - \beta \ln \eta \quad (\text{A.8})$$

L'équation est celle d'une droite de la forme $y = ax + b$. Le papier de Weibull est conçu en traçant la probabilité cumulative de défaillance en utilisant une échelle log log inverse par rapport à c sur une échelle logarithmique. Lorsque l'équation est tracée en fonction de $\ln(c)$, la pente de la droite tracée de cette manière est β , paramètre de forme, c'est-à-dire

$$y = \ln \ln \frac{1}{1-F(c)} \quad (\text{A.9})$$

où

$$a = \beta;$$

$$x = \ln(c);$$

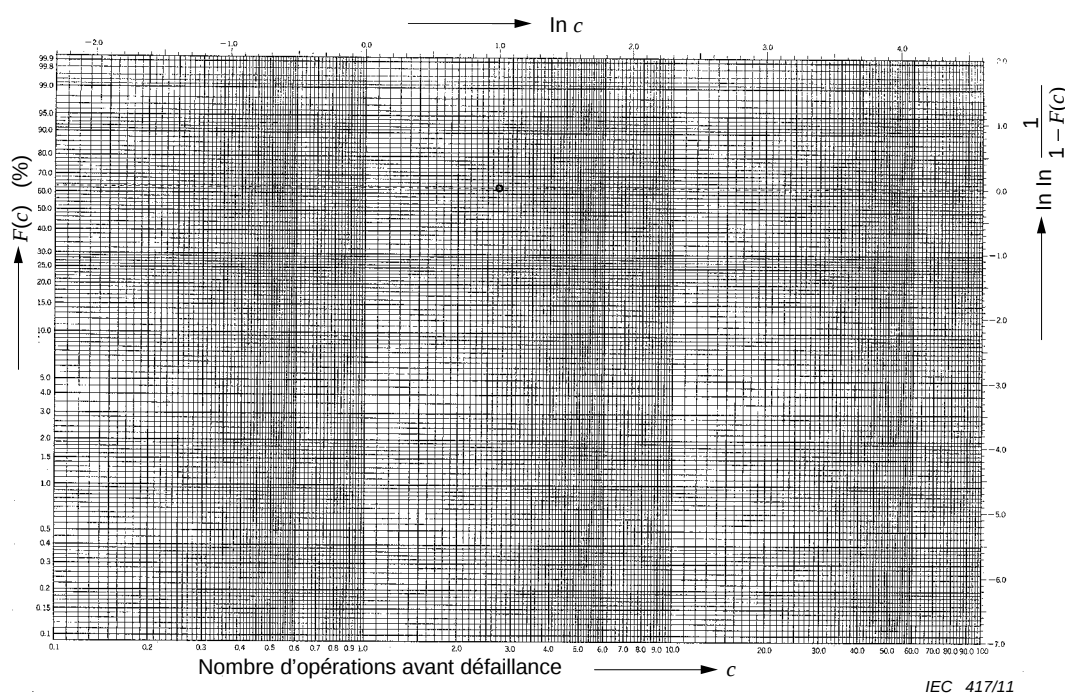
$$b = -\beta \ln(\eta).$$

Le paramètre d'échelle est obtenu d'après $b = -\beta \ln(\eta)$ comme suit:

$$\eta = \exp [-b_0/\beta] \quad (\text{A.10})$$

où b_0 est la valeur de y lorsque c est égal à 1, c'est-à-dire $\ln(c) = 0$.

Lorsque des données suivent une distribution de Weibull, ces données tracées sur un papier de distribution de Weibull deviennent une ligne droite. La Figure A.1 représente un papier vierge de distribution de Weibull.



NOTE Extrait partiel de l'article publié par JUSE PRESS

IEC 417/11

Figure A.1 – Exemple de papier de probabilité de Weibull

A.5.1.3 Tracé de danger

A.5.1.3.1 Classement et tracé des positions

Pour réaliser le tracé de danger, classer les données du plus petit au plus grand nombre de cycles avant défaillance. Ce classement détermine les positions du tracé pour le cycle (c), l'axe et l'ordonnée, la fonction de danger cumulatif. $H(c)$, en pourcentages de valeurs $H(c)$ est calculée par la valeur de danger $h(c)$. Les points de données de $(c_i, H(c_i))$ sont tracés sur le papier de danger cumulatif.

Pour les détails, voir 7.3 de la CEI 61649:2008.

A.5.1.3.2 Papier de tracé de danger cumulatif

La conception du papier de danger cumulatif est représentée ci-dessous.

En prenant les logarithmes naturels dans les deux membres de l'équation (A.5), on obtient:

$$\ln H(c) = \beta \ln c - \beta \ln \eta \quad (\text{A.11})$$

L'équation est celle d'une droite de la forme $y = ax + b$. Le papier de danger cumulatif est conçu en traçant la probabilité cumulative de défaillance en utilisant une échelle log log inverse par rapport à c sur une échelle logarithmique. Lorsque l'équation est tracée en fonction de $\ln(c)$, la pente de la droite tracée de cette manière est β , le paramètre de forme, c'est-à-dire

$$y = \ln H(c) \quad (\text{A.12})$$

où

$$a = \beta;$$

$$x = \ln (c);$$

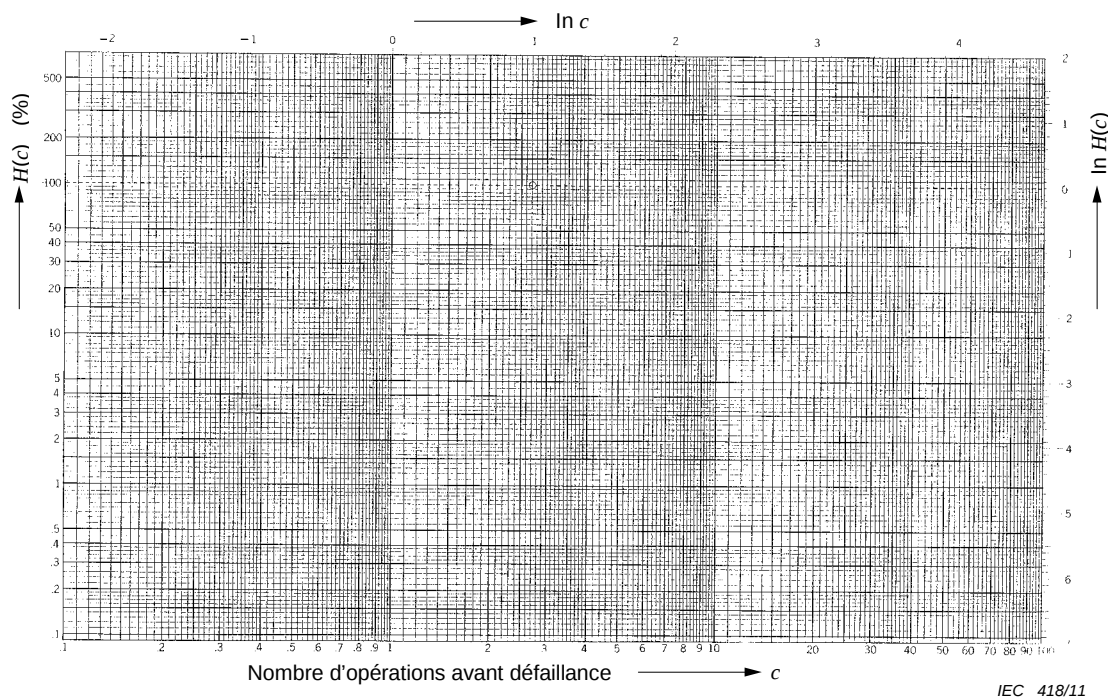
$$b = -\beta \ln (\eta).$$

Le paramètre d'échelle est obtenu d'après $b = -\beta \ln (\eta)$ comme suit:

$$\eta = \exp [-b_0/\beta] \quad (\text{A.13})$$

où b_0 est la valeur de y lorsque c est égal à 1, c'est-à-dire $\ln(c) = 0$.

Lorsque des points de danger suivent une fonction de danger cumulatif, ces points de données tracés sur un papier de danger cumulatif deviennent une ligne droite. La Figure A.2 représente un papier vierge de danger cumulatif.



NOTE Extrait partiel de l'article publié par JUSE PRESS

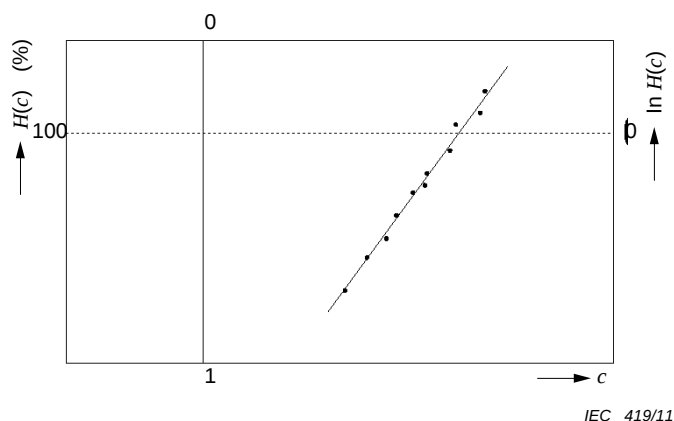
IEC 418/11

Figure A.2 – Exemple de papier de tracé de danger cumulatif

A.5.1.4 Valeurs estimées des paramètres et des caractéristiques de distribution

Les paramètres et les caractéristiques de distribution dans le tracé de probabilité de Weibull et le tracé de Weibull sont communs.

Dessiner une ligne droite (s'adaptant au mieux aux données) entre les points de données du papier de tracé (Figure A.3).



IEC 419/11

Figure A.3 – Tracé des points de données et dessin d'une ligne droite

- 1) L'estimation ponctuelle du paramètre de forme, $\hat{\beta}$ est la suivante

$\hat{\beta}$ est déduite de la pente a de la ligne droite tracée.

Une ligne parallèle est dessinée au-dessus de la ligne d'origine tracée, passant par le point de coordonnées ($\ln c = 1$, $\ln (H(c)) = 0$). La valeur de l'ordonnée de ce point est équivalente à $H(c) = 100 \%$ (ou $F(c) = 63,2 \%$).

$\hat{\beta}$ est lue d'après la valeur de $\ln H(c)$ correspondant au point d'intersection de cette ligne parallèle et d'une ligne verticale passant par $\ln c = 0$, comme représenté à la Figure A.4.

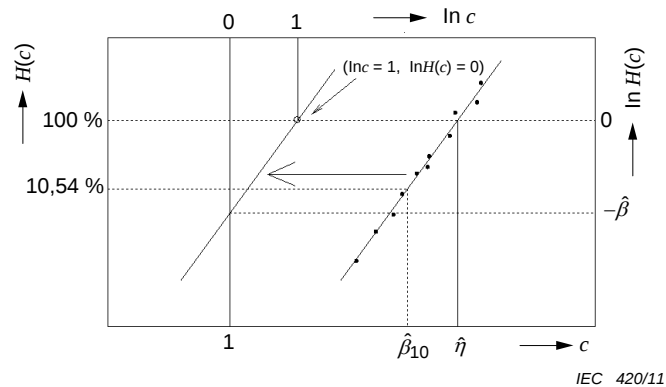


Figure A.4 – Estimation des paramètres de distribution

2) L'estimation ponctuelle du paramètre d'échelle, $\hat{\eta}$ est la suivante

$\hat{\eta}$ est déterminée directement d'après le point d'intersection de la ligne d'origine tracée et d'une ligne horizontale passant par $H(c) = 100 \%$ (ou $F(c) = 63,2 \%$) comme représenté à la Figure A.4.

3) L'estimation ponctuelle des cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF) $\hat{m}$ est la suivante:

$\hat{m}$ est donnée par l'expression suivante:

$$\text{MCTF} = \hat{m} = \hat{\eta} \times \Gamma(1 + 1/\hat{\beta}) \quad (\text{A.14})$$

où $\hat{\eta}$ est extraite de l'étape 2 ci-dessus, et la valeur de la fonction gamma (Γ comme défini par exemple en 2.56 de l'ISO 3534-1:2006) est obtenue respectivement avec une calculatrice scientifique ou une table de fonction gamma appropriée (voir Annexe D).

4) L'estimation ponctuelle de l'écart type, $\hat{\sigma}$ est la suivante:

$\hat{\sigma}$ est donnée par l'expression suivante:

$$\hat{\sigma} = \hat{\eta} \times \sqrt{\Gamma(1 + 2/\hat{\beta}) - \Gamma^2(1 + 1/\hat{\beta})} \quad (\text{A.15})$$

où $\hat{\eta}$ et la valeur de la fonction gamma sont obtenues de la même manière que mentionné à l'étape 3 ci-dessus.

5) L'estimation ponctuelle du fractile (10 %) du nombre de cycles avant défaillance, B_{10} est la suivante:

B_{10} est déterminée directement d'après le point d'intersection de la ligne d'origine tracée et d'une ligne horizontale passant par $F(c) = 10 \%$ dans le tracé de Weibull ou $H(c) = -\ln 0,9 = 10,54 \%$ dans le tracé de danger tel que représenté à la Figure A.4.

A.5.1.5 Mélange de plusieurs modes de défaillance

Le tracé de probabilité de Weibull ou un tracé de danger peut produire une « courbe en patte de chien ».

Si la ligne n'est pas droite, on l'appelle « Weibull en patte de chien ». Celle-ci est provoquée par un mélange de plusieurs modes de défaillance, c'est-à-dire habituellement par des modes de défaillance concurrents.

Lorsque celle-ci apparaît, un examen précis des entités défaillantes constitue la meilleure manière de séparer les données en différents modes de défaillance.

Supposons qu'il existe un ensemble de données de deux types de modes de défaillance (A et B). Il convient d'analyser le premier ensemble comme des données de mode A seulement, en ne tenant pas compte des données de mode B. En conséquence, le deuxième ensemble contient des données de mode B. Ces deux ensembles de données peuvent être utilisés pour prédire la distribution de défaillance.

Si ceci est réalisé correctement, le tracé des deux ensembles de données séparés produit des lignes droites. Une description détaillée est présentée à l'Annexe G de la CEI 61649:2008. On doit noter en particulier qu'au moins 10 défaillances sont requises pour chaque mode de défaillance.

A.5.2 Méthodes numériques

A.5.2.1 Paramètres de distribution

Tandis que la méthode graphique décrite en A.5.1 ci-dessus s'applique à des données complètes censurées uniques ou censurées multiples, la méthode numérique de ce paragraphe ne tient pas compte des données censurées multiples.

L'estimation pour les deux paramètres de la distribution de Weibull est obtenue en résolvant numériquement les équations ci-dessous. La valeur de β satisfaisant à la première équation est l'estimation du maximum de vraisemblance (MLE) de β . Cette valeur est utilisée dans la seconde équation pour déduire la MLE de η .

NOTE 1 Tout sous-programme informatique approprié pour résoudre les équations peut être utilisé pour obtenir β d'après la première équation, étant donné que la convergence vers une valeur unique est habituellement très rapide.

NOTE 2 Se référer à la CEI 61649 pour l'estimation de l'intervalle, la limite inférieure, etc., de β et η . Pour la signification de $\beta <, =, >$ voir Article 8 de la CEI 61649:2008.

Etape 1 – Trouver la valeur de β qui satisfait à l'équation ci-dessous. La solution de cette équation est l'estimation ponctuelle du paramètre de forme de Weibull $\hat{\beta}$.

$$\left[\frac{\sum_{i=1}^r c_i^\beta \ln(c_i) + (n-r)C^\beta \ln(C)}{\sum_{i=1}^r c_i^\beta + (n-r)C^\beta} - \frac{1}{\beta} \right] - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln(c_i) = 0 \quad (\text{A.16})$$

où

n est le nombre d'entités soumises à essai;

r est le nombre d'entités défaillantes ($i = 1, 2, \dots, r$ et $r \leq n$);

C est le nombre de cycles lorsque l'essai a été interrompu ($0 < c_i \leq C$).

Etape 2 – Calculer $\hat{\eta}$ en utilisant la valeur de $\hat{\beta}$, obtenue à l'étape 1, d'après:

$$\hat{\eta} = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r c_i^{\hat{\beta}} + (n-r)C^{\hat{\beta}} \right] \right\}^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \quad (\text{A.17})$$

A.5.2.2 Caractéristiques

A.5.2.2.1 Estimation ponctuelle des cycles moyens de fonctionnement avant défaillance, MCTF, $\hat{m}$

$\hat{m}$ est calculée comme suit:

$$\hat{m} = \hat{\eta} \Gamma(1 + 1/\hat{\beta}) \quad (\text{A.18})$$

où $\hat{\beta}$ et $\hat{\eta}$ sont obtenues d'après les étapes 1 et 2 du A.5.2.1 et la valeur de la fonction gamma Γ est définie en 2.56 de l'ISO 3534-1:2006. En variante, on peut utiliser une table de fonction gamma appropriée (voir Annexe D).

A.5.2.2.2 Ecart type, $\hat{\sigma}$

$\hat{\sigma}$ est calculé comme suit:

$$\hat{\sigma} = \hat{\eta} \times \sqrt{\Gamma(1 + 2/\hat{\beta}) - \Gamma^2(1 + 1/\hat{\beta})} \quad (\text{A.19})$$

A.5.2.2.3 Estimation ponctuelle du fractile (10 %) du nombre de cycles avant défaillance, $\hat{B}_{10}$

$\hat{B}_{10}$ est calculée comme suit:

$$\hat{B}_{10} = \hat{\eta} \left[\ln \left(\frac{1}{0,9} \right) \right]^{1/\hat{\beta}} \quad (\text{A.20})$$

A.5.2.2.4 Estimation ponctuelle de la fiabilité au cycle c

Le calcul et l'indication de la fiabilité du relais au cycle c sont facultatifs.

L'estimation ponctuelle de la fiabilité au cycle c est calculée comme suit:

$$\hat{R}(c) = \exp \left[- (c/\hat{\eta})^{\hat{\beta}} \right] \quad (\text{A.21})$$

Annexe B (informative)

Exemple d'analyse numérique et graphique de Weibull

B.1 Généralités

Cet exemple est extrait de l'Annexe B de la CEI 61649:2008 et il est adapté aux modifications nécessaires pour les relais élémentaires indiqués à l'Article A.1 de la présente norme. Il est fourni comme un cas d'essai numérique pour vérifier la précision des programmes informatiques mettant en œuvre les procédures de la présente norme. Pour démontrer la cohérence avec la méthode graphique de l'analyse de Weibull, les données fournies sont également tracées sur un papier de probabilité de Weibull.

Quarante entités sont mises en essai. L'essai est arrêté au moment de la 20ème défaillance. Ce qui suit représente le nombre de cycles ($\times 10^3$) correspondant aux 20 premières défaillances:

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}	t_{19}	t_{20}
5	10	17	32	32	33	34	36	54	55	55	58	58	61	64	65	65	66	67	68

L'application des procédures numériques de la présente norme produit les résultats suivants:

B.2 Paramètres de distribution

Les valeurs de l'estimation de probabilité maximale (MLE) pour β et η sont les suivantes:

$$\hat{\beta} = 2,091 \text{ et } \hat{\eta} = 84 \times 10^3$$

B.3 Cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF)

L'estimation ponctuelle des cycles moyens de fonctionnement avant défaillance m est la suivante:

$$\hat{m} = 74,39 \times 10^3$$

B.4 Valeur de $\hat{B}_{10}$

L'estimation ponctuelle de B_{10} , le moment (en nombre de cycles) auquel 10 % de la population aura été défaillante est la suivante:

$$\hat{B}_{10} = 28,63 \times 10^3$$

B.5 Durée moyenne de fonctionnement avant défaillance (MTTF)

Seulement lorsqu'une estimation du nombre de cycles par unité de temps appropriée à une utilisation finale spécifique est connue, une durée moyenne de fonctionnement avant défaillance (MTTF) pour le relais peut être déterminée.

Exemple: Si le nombre de cycles par unité de temps est égal à 100 cycles par jour et la valeur MCTF du relais est $74,39 \times 10^3$, la MTTF pour le relais dans cette application peut être calculée comme suit:

$$\text{MTTF} = \text{MCTF}/\text{Nombre de cycles par unité de temps} = 74,39 \times 10^3/100 = 743,9 \text{ jours}$$

B.6 Méthode graphique (tracé de la probabilité de Weibull)

Pour le classement des données, on utilise les mêmes temps de défaillance (en nombre de cycles) que ceux donnés ci-dessus pour les 20 premières défaillances.

Selon A.5.1.2.1, les valeurs de $F(c_i)$ sont calculées en utilisant l'approximation de Benard, voir Tableau B.1.

Tableau B.1 – Données de défaillance classées

Numéro d'ordre i	Temps de défaillance c_i [$\times 10^3$ cycles]	Classement médian $F(c_i)$ [%]
1	5	1,75
2	10	4,2
3	17	6,7
4	32	9,2
5	32	11,6
6	33	14,1
7	34	16,6
8	36	19,1
9	54	21,5
10	55	24,0
11	55	26,5
12	58	29,0
13	58	31,4
14	61	33,9
15	64	36,4
16	65	38,9
17	65	41,3
18	66	43,8
19	67	46,3
20	68	48,8

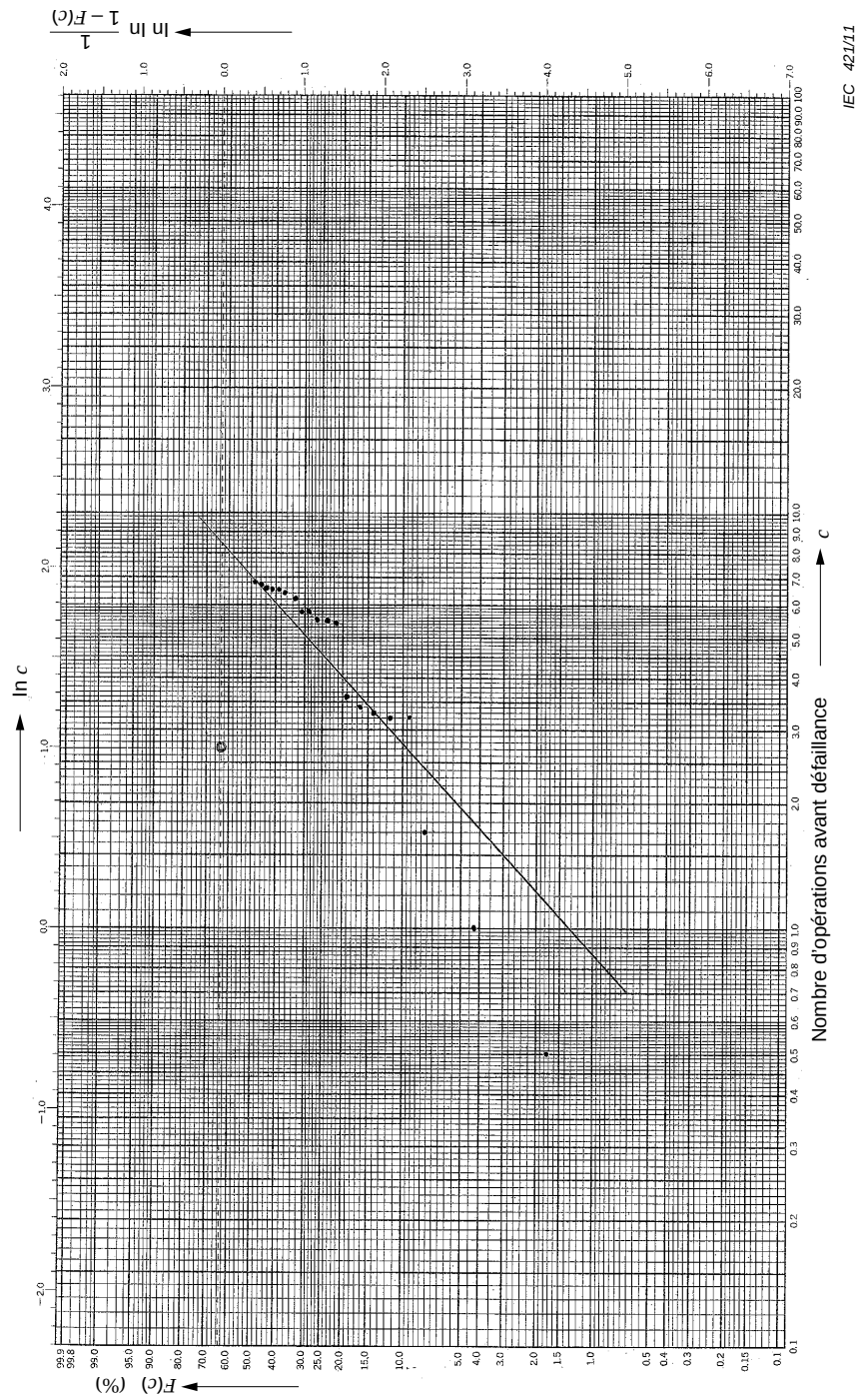
Les coordonnées $(c_i, F(c_i))$ de chaque défaillance sont tracées sur le papier de probabilité de Weibull, voir Figure B.1.

Pour montrer la cohérence entre les méthodes numériques et graphiques, la ligne droite d'origine est dessinée avec les valeurs des paramètres de distribution obtenues à partir de la valeur numérique (voir B.2 ci-dessus):

$$\hat{\beta} = 2,091 \text{ et } \hat{\eta} = 84 \times 10^3$$

Ceci peut être vérifié en utilisant les procédures décrites en A.5.1.4, voir également la Figure A.4.

À partir du point d'intersection de la ligne d'origine tracée et d'une ligne horizontale en $F(c) = 10 \%$, la valeur de B_{10} est estimée à $\hat{B}_{10} = 28 \times 10^3$ cycles, en cohérence avec le résultat numérique de B.4.



NOTE En utilisant le papier de Weibull qui constitue un extrait partiel de l'article publié par JUSE PRESS

Figure B.1 – Diagramme de la probabilité de Weibull pour l'exemple

Le tracé montre un mélange de deux modes de défaillance, une faible pente suivie d'une pente abrupte. Bien que la méthode numérique fournisse des résultats acceptables, une analyse complémentaire est recommandée (voir A.5.1.5). Ceci illustre l'avantage de tracer les données, en ne se basant pas uniquement sur les méthodes analytiques.

Annexe C (informative)

Exemple de tracé de danger cumulatif

C.1 Généralités

Cet exemple concret est fourni pour présenter la procédure de tracé de danger cumulatif lorsque celle-ci est appliquée à une analyse d'essai de durée de vie de relais élémentaires. Cette procédure est calquée sur les dispositions de l'Annexe A. Cette annexe utilise un exemple de données incomplètes avec deux modes de défaillance. La procédure de tracé de danger cumulatif fournit des estimations des paramètres de distribution et des caractéristiques de fiabilité à partir d'un tracé et, en utilisant une simple calculatrice scientifique ou des tables pour la fonction gamma.

Dans cet exemple, on utilise des données censurées multiples. Les équations numériques pour les paramètres de distribution données en A.5.2 ne sont donc pas applicables.

NOTE L'édition actuelle de la CEI 61649 ne couvre pas non plus ce cas.

En conséquence, seule l'évaluation graphique est décrite dans cette annexe, tandis que l'estimation numérique est omise.

C.2 Procédure de tracé de danger cumulatif

C.2.1 Généralités

Cet article décrit une procédure pour estimer les paramètres d'une distribution de Weibull et les caractéristiques de fiabilité des données, en utilisant un papier de danger cumulatif.

C.2.2 Classement et tracé

Les données observées sont classées et tracées aux étapes 1 à 6. Il est recommandé d'utiliser pour le tracé une feuille de calcul illustrée au Tableau C.1.

Tableau C.1 – Feuille de calcul pour l'analyse de danger cumulatif

N° d'échantillon	Classement	Classement inverse	Cycles (c_i)	Mode de défaillance	Valeur de danger	Valeur de danger cumulatif (H_j %)	
	i	$Ki=n-i+1$		M_j	h %	$M1$	$M2$

Etape 1

Le classement, i et le classement inverse, K_i sont entrés dans les colonnes respectives. La valeur de K_i est calculée comme suit:

$$K_i = n + 1 - i$$

où

n est le nombre d'entités soumises à essai.

Etape 2

Les données observées sont triées de la plus petite à la plus grande dans l'ordre des cycles avant défaillance, les valeurs des cycles avant défaillance étant introduites (c_i , correspondant à i). Le numéro de l'échantillon est également entré dans la colonne « N° », correspondant à c_i .

Etape 3

Les valeurs de danger, $h(c_i)$ sont entrées dans la colonne respective correspondant à c_i et elles sont calculées comme suit:

$$h(c_i) = 1 / K_i \times 100 (\%)$$

Etape 4

Si des modes de défaillance multiples apparaissent, les numéros des modes de défaillance sont entrés dans la colonne de M_j correspondant à c_i . Ici, j est le numéro de code d'un mode de défaillance spécifique.

Etape 5

Les valeurs des dangers cumulatifs $H_j(c_i)$ sont entrées dans la colonne respective et chaque valeur est calculée conformément au même mode de défaillance (M_j) comme suit:

$$H_j(c_i) = \sum_{l \geq 1} h(c_l)$$

NOTE Voir un exemple au Tableau C.2.

Etape 6

Les points de données correspondant à (c_i , $H_j(c_i)$) sont tracés sur un diagramme de danger cumulatif. Une ligne droite est ensuite dessinée, entre les points de données de chaque mode de défaillance s'adaptant au mieux aux données.

Etape 7

Si la distribution des points de données est proche de la ligne droite, passer à C.2.3, car le résultat semble aligné avec une distribution de Weibull, $\gamma = 0$.

S'il est difficile de dessiner la ligne droite, il vaut mieux revoir les modes de défaillance et effectuer un diagnostic de défaillance détaillé des relais utilisés pour l'essai ou réévaluer les conditions d'essais, etc.

C.2.3 Estimation des paramètres de distribution

Les paramètres de forme et d'échelle sont déterminés à partir du papier de tracé comme suit:

- 1) L'estimation de point du paramètre de forme, $\hat{\beta}$ est la suivante

Une ligne parallèle est dessinée au-dessus de la ligne d'origine tracée, passant par le point de coordonnées ($\ln c = 1$, $\ln H(c) = 0$). La valeur de l'ordonnée de ce point est équivalente à $H(c) = 100 \%$ (ou $F(c) = 63,2 \%$).

$\hat{\beta}$ est lue d'après la valeur de $\ln H(c)$ correspondant au point d'intersection de cette ligne parallèle et d'une ligne verticale passant par $\ln c = 0$, comme représenté à la Figure C.1.

- 2) L'estimation ponctuelle du paramètre d'échelle, $\hat{\eta}$ est la suivante

$\hat{\eta}$ est déterminée directement d'après le point d'intersection de la ligne d'origine tracée et d'une ligne horizontale passant par $H(c) = 100 \%$ (ou $F(c) = 63,2 \%$) comme représenté à la Figure C.1.

C.2.4 Estimation des caractéristiques de distribution

Les valeurs estimées des cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF) $\hat{m}$, de l'écart type $\hat{\sigma}$ et du fractile (10 %) du nombre de cycles avant défaillance $\hat{B}_{10}$ sont obtenues comme suit:

- 1) L'estimation ponctuelle des cycles moyens de fonctionnement avant défaillance (MCTF) $\hat{m}$ est la suivante:

$\hat{m}$ est obtenue d'après l'équation (A.14) avec les valeurs de $\hat{\eta}$ et $\hat{\beta}$ du C.2.3 ci-dessus et la valeur de la fonction gamma est déterminée avec une calculatrice scientifique appropriée ou une table de fonction gamma appropriée.

- 2) L'estimation ponctuelle de l'écart type, $\hat{\sigma}$ est la suivante :

$\hat{\sigma}$ est obtenue de la même façon d'après l'équation (A.15).

- 3) L'estimation ponctuelle du fractile (10 %) du nombre de cycles avant défaillance, $\hat{B}_{10}$ est la suivante :

On peut lire $\hat{B}_{10}$ d'après la valeur de c au point d'intersection de la ligne d'origine tracée et d'une ligne horizontale passant par $H(c) = 10,54 \%$, comme représenté à la Figure C.1.

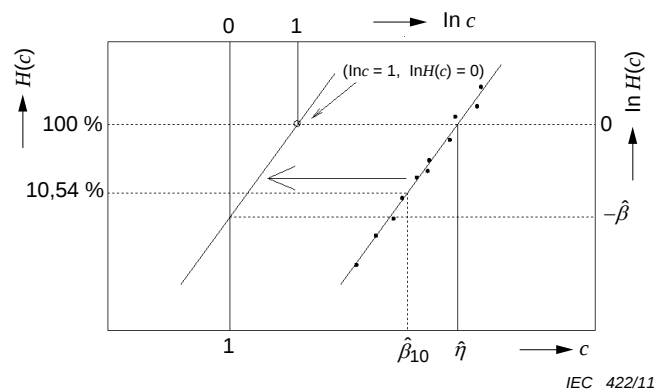


Figure C.1 – Estimation des paramètres de distribution

C.3 Exemple appliqué aux données d'essai de durée de vie

C.3.1 Généralités

Cet exemple est fourni pour démontrer l'utilité d'une analyse de fiabilité par le tracé de danger de Weibull basé sur des essais de durée de vie de relais élémentaires. Trente entités sont mises en essai. L'essai est censuré (tronqué) à 1 240 000 cycles. La majorité des entités échoue en raison de la soudure (mode de défaillance 1) ou de l'érosion des contacts (mode de défaillance 2).

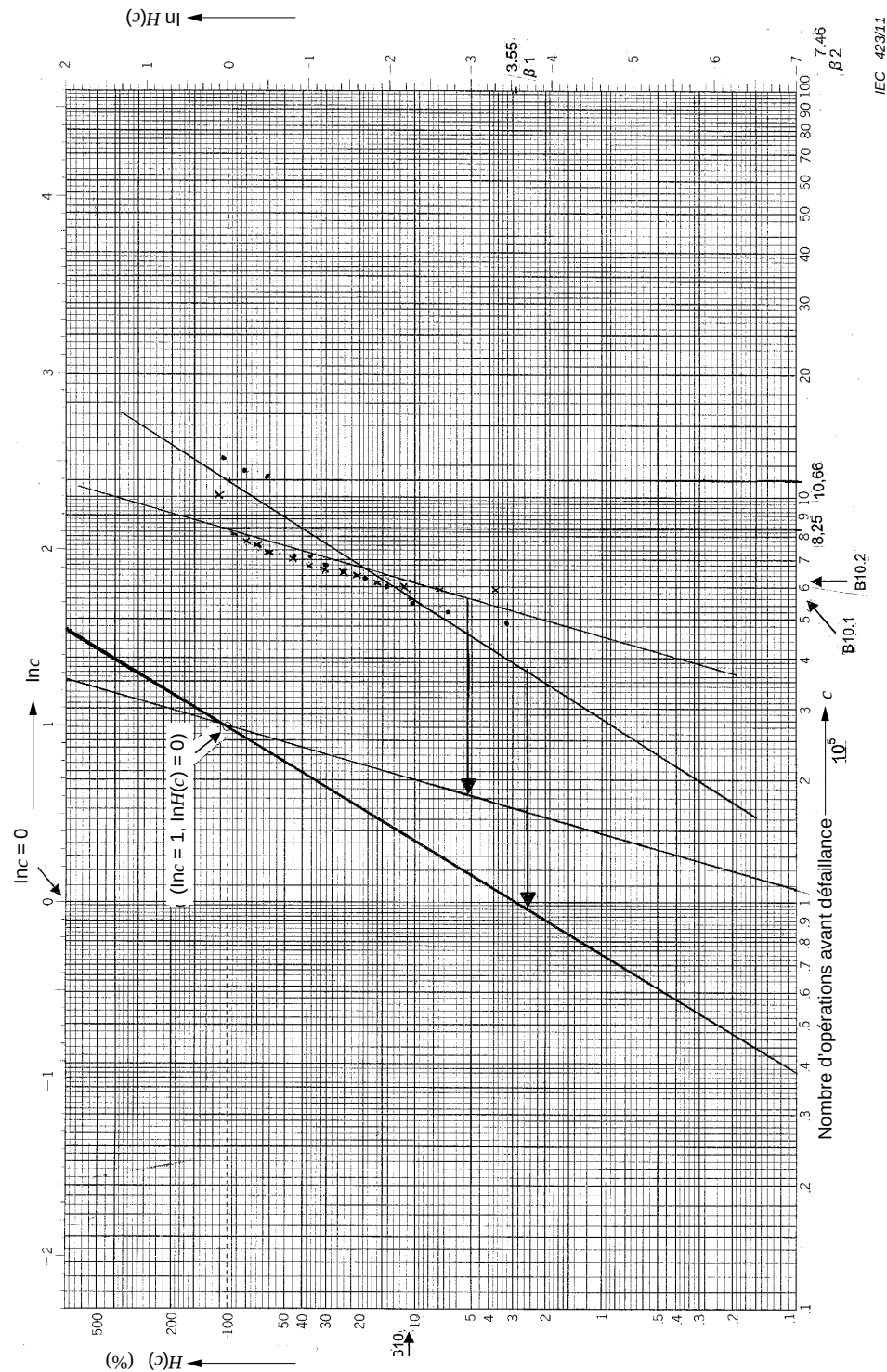
C.3.2 Classement et tracé

L'application de la procédure de l'étape 1 à l'étape 6 de C.2.2 pour la feuille de calcul et le tracé de danger donne le Tableau C.2 et la Figure C.2.

Tableau C.2 – Exemple de feuille de calcul

N° d'échantillon	Classement	Classement inverse	KCycles(c_i)	Mode de défaillance	Valeur de danger	Valeur de danger cumulatif ($H_j\%$)	
	i	$Ki = n - i + 1$		M_j	$h \%$	$M1$	$M2$
12	1	30	490	1	3,333	3,333	-
27	2	29	520	1	3,448	6,782	-
3	3	28	545	1	3,571	10,353	-
10	4	27	585	2	3,704	-	3,704
6	5	26	585	2	3,846	-	7,550
22	6	25	600	2	4,000	-	11,550
18	7	24	600	1	4,167	14,520	-
17	8	23	605	2	4,348	-	15,898
30	9	22	635	1	4,545	19,065	-
9	10	21	640	2	4,762	-	20,660
23	11	20	645	2	5,000	-	25,660
28	12	19	655	1	5,263	24,328	-
21	13	18	655	2	5,556	-	31,216
5	14	17	670	2	5,882	-	37,098
15	15	16	680	1	6,250	30,578	-
1	16	15	715	1	6,667	37,245	-
8	17	14	715	2	7,143	-	44,241

N° d'échantillon	Classement	Classement inverse	KCycles(c_i)	Mode de défaillance	Valeur de danger	Valeur de danger cumulatif ($H_j\%$)	
	i	$Ki = n - i + 1$		M_j	$h \%$	$M1$	$M2$
2	18	13	715	1	7,692	44,937	-
20	19	12	730	2	8,333	-	52,574
4	20	11	730	2	9,091	-	61,665
19	21	10	765	2	10,000	-	71,665
29	22	9	780	2	11,111	-	82,776
11	23	8	815	2	12,500	-	95,276
26	24	7	1 025	2	14,286	-	109,562
25	25	6	1 120	1	16,667	61,604	-
24	26	5	1 160	1	20,000	81,604	-
16	27	4	1 240	1	25,000	106,604	-
14	28	3	1 240	C	-	-	-
7	29	2	1 240	C	-	-	-
13	30	1	1 240	C	-	-	-
Mode 1 = Soudage Mode 2 = Erosion de contact C = Censuré							



NOTE En utilisant le papier de Weibull qui constitue un extrait partiel de l'article publié par JUSE PRESS

Figure C.2 – Tracés de danger cumulatif

La distribution de cet échantillon est du type de Weibull en « patte de chien ». Les points de données correspondant à $(c_i, H_j(c_i))$ sont tracés en utilisant des cercles pleins (●) pour les défaillances de soudure (mode 1), et des croix (x) pour les défaillances d'érosion de contact (mode 2).

C.3.3 Estimation des paramètres de distribution

L'application des procédures de C.2.3 donne les résultats suivants:

$$\hat{\beta}_1 = 3,55 \quad \hat{\eta}_1 = 1,066 \times 10^6$$

$$\hat{\beta}_2 = 7,46 \quad \hat{\eta}_2 = 8,25 \times 10^5$$

C.3.4 Estimation des caractéristiques de distribution

L'application des procédures de C.2.4 donne les résultats suivants:

$$\hat{m}_1 = 9,60 \times 10^5 \quad \hat{\sigma}_1 = 2,83 \times 10^5 \quad \hat{B}_{10,1} = 5,60 \times 10^5$$

$$\hat{m}_2 = 7,74 \times 10^5 \quad \hat{\sigma}_2 = 1,22 \times 10^5 \quad \hat{B}_{10,2} = 6,10 \times 10^5$$

C.4 Document de référence

H. Shiomi, T. Mitsuhashi, M. Saito, A Masuda, *How to use probability paper in reliability*, 1983 (disponible en japonais seulement)

Annexe D (informative)

Fonction gamma

La fonction gamma est définie en 2.56 de l'ISO 3534-1:2006.

Le Tableau D.1 donne la valeur de $\Gamma(1 + 1/k)$ en fonction de k . Pour les valeurs k non énumérées dans ce tableau, une interpolation linéaire est acceptable.

Tableau D.1 – Valeurs de la fonction gamma

k	$\Gamma(1 + 1/k)$	k	$\Gamma(1 + 1/k)$	k	$\Gamma(1 + 1/k)$
0,20	120	1,50	0,902 7	3,60	0,901 1
0,25	24	1,55	0,899 4	3,70	0,902 4
0,30	9,260 3	1,60	0,896 6	3,80	0,903 8
0,35	5,029 5	1,65	0,894 2	3,90	0,905 1
0,40	3,323 3	1,70	0,892 2	4,00	0,906 4
0,45	2,505 5	1,75	0,890 6	4,10	0,907 6
0,50	2,000 0	1,80	0,889 2	4,20	0,908 9
0,55	1,702 4	1,85	0,888 2	4,30	0,910 1
0,60	1,504 5	1,90	0,887 4	4,40	0,911 3
0,65	1,360 3	1,95	0,886 7	4,50	0,912 5
0,70	1,265 7	2,00	0,886 2	4,60	0,913 7
0,75	1,190 6	2,10	0,885 7	4,70	0,914 9
0,80	1,133 0	2,20	0,885 6	4,80	0,916 0
0,85	1,087 8	2,30	0,885 9	4,90	0,917 1
0,90	1,052 2	2,40	0,886 5	5,00	0,918 2
0,95	1,023 8	2,50	0,887 2	5,20	0,920 2
1,00	1,000 0	2,60	0,888 2	5,40	0,922 2
1,05	0,980 8	2,70	0,889 3	5,60	0,924 1
1,10	0,964 9	2,80	0,890 3	5,80	0,926 0
1,15	0,951 7	2,90	0,891 7	6,00	0,927 7
1,20	0,940 6	3,00	0,893 0	6,20	0,929 3
1,25	0,931 4	3,10	0,894 3	6,40	0,930 9
1,30	0,923 6	3,20	0,895 6	6,60	0,932 5
1,35	0,916 9	3,30	0,897 0	6,80	0,934 0
1,40	0,911 4	3,40	0,898 4	7,00	0,935 4
1,45	0,906 7	3,50	0,899 7	8,00	0,941 7

Bibliographie

ISO 3534 (toutes les parties), *Statistique – Vocabulaire et symboles*

ISO 3534-1:2006, *Statistiques – Vocabulaire et symboles – Partie 1: Termes statistiques généraux et termes utilisés en calcul des probabilités*

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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