

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Methods for product accelerated testing

Méthodes d'essais accélérés de produits

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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

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

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de 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.

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Methods for product accelerated testing

Méthodes d'essais accélérés de produits

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XD

ICS 03.120.01; 21.020

ISBN 978-2-83220-861-8

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, symbols and abbreviations.....	9
3.1 Terms and definitions	9
3.2 Symbols and abbreviated terms.....	11
4 General description of the accelerated test methods.....	12
4.1 Cumulative damage model	12
4.2 Classification, methods and types of test acceleration	14
4.2.1 General	14
4.2.2 Type A: qualitative accelerated tests	15
4.2.3 Type B: quantitative accelerated tests	15
4.2.4 Type C: quantitative time and event compressed tests	16
5 Accelerated test models	17
5.1 Type A, qualitative accelerated tests	17
5.1.1 Highly accelerated limit tests (HALT)	17
5.1.2 Highly accelerated stress test (HAST)	21
5.1.3 Highly accelerated stress screening/audit (HASS/HASA)	21
5.1.4 Engineering aspects of HALT and HASS	22
5.2 Type B and C – Quantitative accelerated test methods.....	23
5.2.1 Purpose of quantitative accelerated testing	23
5.2.2 Physical basis for the quantitative accelerated Type B test methods.....	23
5.2.3 Type C tests, time (C_1) and event (C_2) compression	24
5.3 Failure mechanisms and test design.....	26
5.4 Determination of stress levels, profiles and combinations in use and test – stress modelling	27
5.4.1 General.....	27
5.4.2 Step-by-step procedure	27
5.5 Multiple stress acceleration methodology – Type B tests	27
5.6 Single and multiple stress acceleration for Type B tests	30
5.6.1 Single stress acceleration methodology	30
5.6.2 Stress models with stress varying as a function of time – Type B tests	37
5.6.3 Stress models that depend on repetition of stress applications – Fatigue models	38
5.6.4 Other acceleration models – Time and event compression.....	40
5.7 Acceleration of quantitative reliability tests	40
5.7.1 Reliability requirements, goals, and use profile	40
5.7.2 Reliability demonstration or life tests	42
5.7.3 Testing of components for a reliability measure	47
5.7.4 Reliability measures for components and systems/items.....	48
5.8 Accelerated reliability compliance or evaluation tests	48
5.9 Accelerated reliability growth testing	50
5.10 Guidelines for accelerated testing	50
5.10.1 Accelerated testing for multiple stresses and the known use profile	50
5.10.2 Level of accelerated stresses	51

5.10.3 Accelerated reliability and verification tests	51
6 Accelerated testing strategy in product development	51
6.1 Accelerated testing sampling plan	51
6.2 General discussion about test stresses and durations	52
6.3 Testing components for multiple stresses	53
6.4 Accelerated testing of assemblies	53
6.5 Accelerated testing of systems	53
6.6 Analysis of test results	53
7 Limitations of accelerated testing methodology	53
Annex A (informative) Highly accelerated limit test (HALT)	55
Annex B (informative) Accelerated reliability compliance and growth test design	59
Annex C (informative) Comparison between HALT and conventional accelerated testing	74
Annex D (informative) Estimating the activation energy, E_a	75
Annex E (informative) Calibrated accelerated life testing (CALT)	77
Annex F (informative) Example on how to estimate empirical factors	79
Annex G (informative) Determination of acceleration factors by testing to failure	84
Bibliography	87
Figure 1 – Probability density functions (PDF) for cumulative damage, degradation, and test types	13
Figure 2 – Relationship of PDFs of the product strength vs. load in use	18
Figure 3 – How uncertainty of load and strength affects the test policy	19
Figure 4 – PDFs of operating and destruct limits as a function of applied stress	20
Figure 5 – Line plot for Arrhenius reaction model	34
Figure 6 – Plot for determination of the activation energy	35
Figure 7 – Multiplier of the test stress duration for demonstration of required reliability for compliance or reliability growth testing	45
Figure 8 – Multiplier of the duration of the load application for the desired reliability	46
Figure B.1 – Reliability as a function of multiplier k and for combinations of parameters a and b	61
Figure B.2 – Determination of the multiplier k	64
Figure B.3 – Determination of the growth rate	73
Figure D.1 – Plotting failures to estimate the activation energy E_a	76
Figure F.1 – Weibull graphical data analysis	81
Figure F.2 – Scale parameter as a function of the temperature range	82
Figure F.3 – Probability of failure as a function of number of cycles $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	83
Figure G.1 – Weibull plot of the three data sets	85
Figure G.2 – Scale parameters' values fitted with a power line	86
Table 1 – Test types mapped to the product development cycle	14
Table A.1 – Summary of HALT test results for a DC/DC converter	56
Table A.2 – Summary of HALT results from a medical system	57
Table A.3 – Summary of HALT results for a Hi-Fi equipment	58
Table B.1 – Environmental stress conditions of an automotive electronic device	63

Table B.2 – Product use parameters	67
Table B.3 – Assumed product use profile	71
Table B.4 – Worksheet for determination of use times to failures	72
Table B.5 – Data for reliability growth plotting	73
Table C.1 – Comparison between HALT and conventional accelerated testing	74
Table F.1 – Probability of failure of test samples A and B	80
Table F.2 – Data transformation for Weibull plotting.....	80
Table G.1 – Voltage test failure data for Weibull distribution	84

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

METHODS FOR PRODUCT ACCELERATED TESTING

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 62506 has been prepared by IEC technical committee 56: Dependability.

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

FDIS	Report on voting
56/1503/FDIS	56/1513/RVD

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

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

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

INTRODUCTION

Many reliability or failure investigation test methods have been developed and most of them are currently in use. These methods are used to either determine product reliability or to identify potential product failure modes, and have been considered effective as demonstrations of reliability:

- fixed duration,
- sequential probability ratio,
- reliability growth tests,
- tests to failure, etc.

Such tests, although very useful, are usually lengthy, especially when the product reliability that has to be demonstrated was high. The reduction in time-to-market periods as well as competitive product cost, increase the need for efficient and effective accelerated testing. Here, the tests are shortened through the application of increased stress levels or by increasing the speed of application of repetitive stresses, thus facilitating a quicker assessment and growth of product reliability through failure mode discovery and mitigation.

There are two distinctly different approaches to reliability activities:

- the first approach verifies, through analysis and testing, that there are no potential failure modes in the product that are likely to be activated during the expected life time of the product under the expected operating conditions;
- the second approach estimates how many failures can be expected after a given time under the expected operating conditions.

Accelerated testing is a method appropriate for both cases, but used quite differently. The first approach is associated with qualitative accelerated testing, where the goal is identification of potential faults that eventually might result in product field failures. The second approach is associated with quantitative accelerated testing where the product reliability may be estimated based on the results of accelerated simulation testing that can be related back to the use of the environment and usage profile.

Accelerated testing can be applied to multiple levels of items containing hardware or software. Different types of reliability testing, such as fixed duration, sequential test-to-failure, success test, reliability demonstration, or reliability growth/improvement tests can be candidates for accelerated methods. This standard provides guidance on selected, commonly used accelerated test types. This standard should be used in conjunction with statistical test plan standards such as IEC 61123, IEC 61124, IEC 61649 and IEC 61710.

The relative merits of various methods and their individual or combined applicability in evaluating a given system or item, should be reviewed by the product design team (including dependability engineering) prior to selection of a specific test method or a combination of methods. For each method, consideration should also be given to the test time, results produced, credibility of the results, data required to perform meaningful analysis, life cycle cost impact, complexity of analysis and other identified factors.

METHODS FOR PRODUCT ACCELERATED TESTING

1 Scope

This International Standard provides guidance on the application of various accelerated test techniques for measurement or improvement of product reliability. Identification of potential failure modes that could be experienced in the use of a product/item and their mitigation is instrumental to ensure dependability of an item.

The object of the methods is to either identify potential design weakness or provide information on item dependability, or to achieve necessary reliability/availability improvement, all within a compressed or accelerated period of time. This standard addresses accelerated testing of non-repairable and repairable systems. It can be used for probability ratio sequential tests, fixed duration tests and reliability improvement/growth tests, where the measure of reliability may differ from the standard probability of failure occurrence.

This standard also extends to present accelerated testing or production screening methods that would identify weakness introduced into the product by manufacturing error, which could compromise product dependability.

2 Normative references

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

IEC 60068 (all parts), *Environmental testing*

IEC 60300-3-1:2003, *Dependability management – Part 3-1: Application guide – Analysis techniques for dependability – Guide on methodology*

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

IEC 60605-2, *Equipment reliability testing – Part 2: Design of test cycles*

IEC 60721 (all parts), *Classification of environmental conditions*

IEC 61014:2003, *Programmes for reliability growth*

IEC 61164:2004, *Reliability growth – Statistical test and estimation methods*

IEC 61124:2012, *Reliability testing – Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity*

IEC 61163-2, *Reliability stress screening – Part 2: Electronic components*

IEC 61649:2008, *Weibull analysis*

IEC 61709, *Electronic components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion*

IEC 61710, *Power law model – Goodness-of-fit tests and estimation methods*

IEC 62303, *Radiation protection instrumentation – Equipment for monitoring airborne tritium*

IEC/TR 62380, *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*

IEC 62429, *Reliability growth – Stress testing for early failures in unique complex systems*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviations

For the purposes of this document, the term and definitions given in IEC 60050-191:—, as well as the following, apply.

NOTE Symbols for reliability, availability, maintainability and safety measures follow those of IEC 50060-191:1990, where available.

3.1 Terms and definitions

3.1.1

item

subject being considered

Note 1 to entry: The item may be an individual part, component, device, functional unit, equipment, subsystem, or system.

Note 2 to entry: The item may consist of hardware, software, people or any combination thereof.

Note 3 to entry: The item is often comprised of elements that may each be individually considered. See "sub-item", definition 191-41-02 and "indenture level", definition 191-41-05.

Note 4 to entry: IEC 60050-191:1990, first edition, identified the term "entity" as a synonym, which is not true for all applications.

Note 5 to entry: The definition for item given in the first edition is a description rather than a definition. This new definition provides meaningful substitution throughout this standard. The words of the former definition form the new note 1.

[SOURCE: IEC 60050-191:—, definition 191-41-01] [1]¹

3.1.2

step stress

step stress test

test in which the applied stress is increased, after each specified interval, until failure occurs or a predetermined stress level is reached

Note 1 to entry: The 'intervals' could be specified in terms of number of stress applications, durations, or test sequences.

Note 2 to entry: The test should not alter the basic failure modes, failure mechanisms, or their relative prevalence.

[SOURCE: IEC 60050-191:—, definition 191-49-10]

3.1.3

acceleration factor

ratio between the item failure distribution characteristics or reliability measures (e.g. failure intensities) of an item when it is subject to stresses in expected use and those the item acquires when the higher level stresses are applied for achieving a shorter test duration

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

Note 1 to entry: For a test to be effectively accelerated, the acceleration factor is >1 .

Note 2 to entry: When the failure distribution Poisson is assumed with constant failure rate, then the acceleration factor corresponds to the ratio of time under stress in use vs. time under increased stress in test.

3.1.4

highly accelerated limit test

HALT

test or sequence of tests intended to identify the most likely failure modes of the product in a defined stress environment

Note 1 to entry: HALT is sometimes spelled out as the highly accelerated life test (as it was originally named in error). However, as a non-measurable accelerated test, it does not provide information on life duration, but on the magnitude of stress which represents the limit of the design.

3.1.5

highly accelerated stress test

HAST

test where applied stresses are considerably increased in order to reduce duration of their application

3.1.6

highly accelerated stress screening

HASS

screening intended to identify latent defects in a product caused by manufacturing process or control errors

3.1.7

highly accelerated stress audit

HASA

process monitoring tool where a sample from a production lot is tested to detect potential weaknesses in a product caused by manufacturing

3.1.8

activation energy

E_a

empirical factor for estimating the acceleration caused by a change in absolute temperature

Note 1 to entry: Activation energy is usually measured in electron volts per degree Kelvin.

3.1.9

event compression

increasing stress repetition frequency to be considerably higher than it is in the field

3.1.10

time compression

removal of exposure time at low or deemed non damaging stress levels from a test for purpose of acceleration

3.1.11

precipitation screen

screening profile to precipitate, through failure, conversion of latent into permanent faults

3.1.12

detection screen

low stress level exposure to detect intermittent faults

3.2 Symbols and abbreviated terms

Symbol/ Abbreviation	Description
-------------------------	-------------

$R(t)$	reliability as a function of time; probability of survival past the time t
--------	--

NOTE 1 IEC 60050-191:1990, definition 191-12-01 uses the general symbol $R(t_1, t_2)$. Time may be substituted by cycles, measure of distance, etc.

$\lambda(t)$	failure rate as a function of time
--------------	------------------------------------

NOTE 2 In reliability growth testing, the same symbol normally used for the instantaneous failure rate can be used for variable failure intensity.

HALT	highly accelerated limit test
HASS	highly accelerated stress screening test
HAST	highly accelerated stress test
HASA	highly accelerated stress audit
$\lambda(S)$	failure rate as a function of a stress
UUT	unit under test
A	acceleration, acceleration factor
A_{test}	overall acceleration in a test
ADT	accelerated degradation testing
DSL	design specification limit
RTL	reliability test level
SL	specification limit
DL	destruct limit
LDL	lower destruct limit
UDL	upper destruct limit
OL	operating limit
UOL	upper operating limit
LOL	lower operating limit
SPRT	sequential probability ratio test
RG	reliability growth
URTL	upper reliability test limit
LRTL	lower reliability test limit
THB	temperature humidity bias test
TTF	time to failure
MTBF	mean operating time between failures
MTTF	mean time to failure
AF	acceleration factor
FIT	failure to time
CALT	calibrated accelerated life testing
ADT	accelerated degradation test
t_0	start of a period of in determination of product destruct life rest
t_L	duration of a predetermined time, e. g. life
SPRT	sequential probability ratio tests

4 General description of the accelerated test methods

4.1 Cumulative damage model

Accelerated testing of any type is based on the cumulative damage principle. The stresses of the product in its life cause progressive damage that accumulates throughout the product life. This damage may or may not result in a product's failure in the field.

The strategy of any type of accelerated testing is to produce, by increasing stress levels during testing, cumulative damage equivalent to that expected in the product's life for the type of expected stress. Determination of product destruct limits, without reliability estimation, provides information on whether there exists a sufficient margin between those destruct limits and product specification limits, thus providing assurance that the product will survive its predetermined life period without failure related to that specific stress type. This technique may or may not necessarily quantify a probability of product survival for its life, just assurance that the necessary adjustments in product strength would help eliminate such failure in product use. Where sufficient margins are determined unrelated to the probability of survival, the type of test is qualitative. In tests where this probability of survival is determined, the magnitude of the stress is correlated to the probability that the product would survive that stress type beyond the predetermined life, and this test type is quantitative.

Figure 1 depicts the principle of cumulative damage in both qualitative and quantitative accelerated tests.

In Figure 1, for simplicity, all stresses, operating limits, destruct limits, etc. are shown as absolute values. The specification values for an item are usually given in both extremes, upper and lower, thus the upper and lower (or low) specification limit, USL and LSL with the corresponding design limits (DSL), UDL and LDL, the upper and lower operating limits, UOL and LOL, and also the reliability test limits, URTL and LRTL. The rationale is that the opposite (negative stresses, may also cause cumulative damage probably with a differently failure mechanism, thus the relationship between the expected and specified limits can be illustrated in the same manner as for the high or positive stress. As an example, cold temperature extremes might produce the same or different failure modes in a product. To avoid clutter, the positive and the negative thermal or any other stresses are not separately shown in Figure 1, thus the magnitudes of stresses are either positive or negative, and thus represented as absolute values only as upper or lower limits.

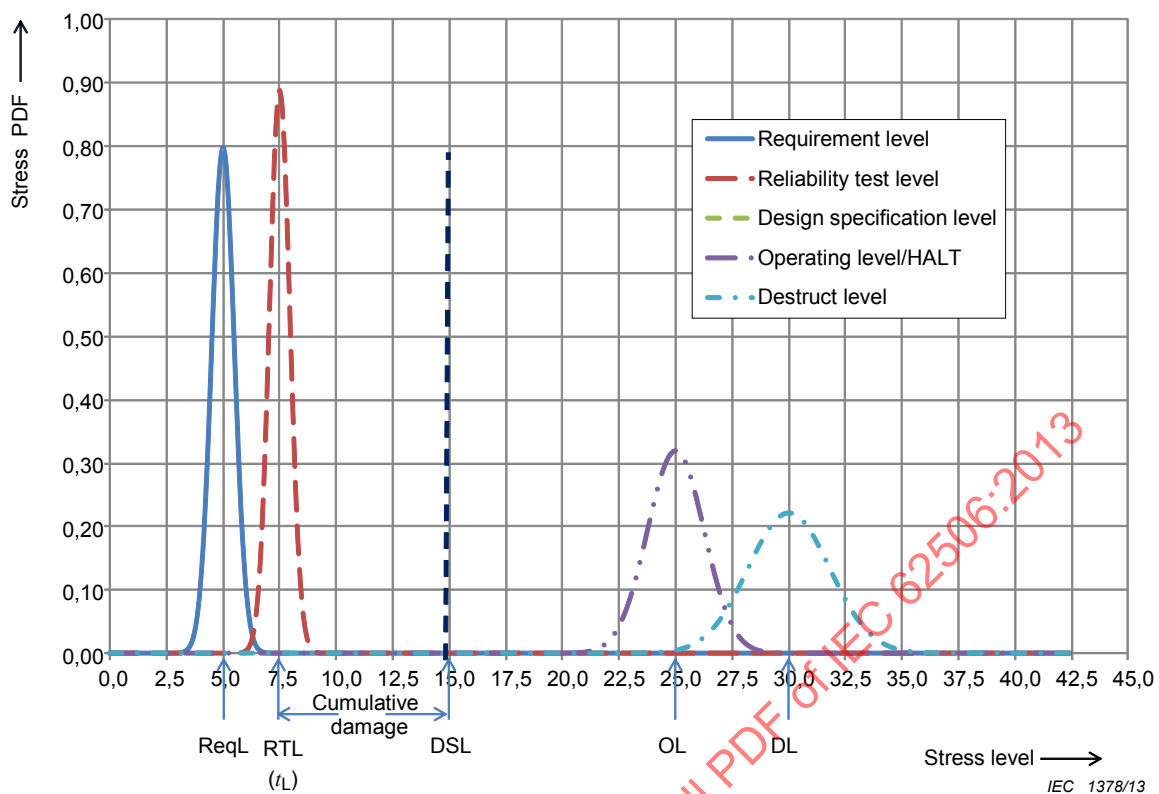


Figure 1 – Probability density functions (PDF) for cumulative damage, degradation, and test types

The graph in Figure 1 shows the required strength of a product regarding a stress for the duration of its lifetime, from beginning of life (e.g. time when the product is made), t_0 through the end of life, t_L . The strength and stresses in tests are also assumed to have a Gaussian distribution.

The different types of accelerated tests can now be illustrated using Figure 1 as a conceptual model.

Functional testing is carried out within the range of the requirement specification and at the level of the specification. In this area no failures should occur during the test; design is validated to allow operation within the upper and lower specification limits. Accelerated testing of Type B and C (4.2.3 and 4.2.4), i.e. accelerated degradation testing (ADT) or cumulative damage testing can be illustrated as the distance between the design specification level (DSL) and the level where the reliability demonstration test should be performed (RTL). When the degradation reduces the performance below the requirement specifications the product can be declared as failed, if this behaviour is defined as a failure. When testing the product at time t_0 no failures should be expected for stress levels up to and including the design specification level (DSL).

The product design specification should take into consideration certain degradation during the product's life which is resultant from the cumulative damage of the stresses expected in life, thus its limit is the design specification limit (DSL) which is higher than the requirement limit (RL) in order to provide the necessary margin. After product degradation resultant from the cumulative damage caused by expected stresses, the reliability test provides information on the existing margin between the test level (the remaining strength) and the requirement. This margin is a measure of reliability at the end of required period, t_L .

The ultimate strength of the design is considerably higher than the design specifications and this is the level determined in the qualitative accelerated test where the goal is to identify

design weaknesses which could compromise product reliability, i.e. the weaknesses that could occur in the product's life span, as the product degrades. Thus, the strength in the qualitative test is demonstrated at operating limit (OL).

The destruct limit is above (beyond) the operating limit, and is denoted as DL. This is where a permanent failure is observed. If OL or DL are close to the DSL or standard deviation of the OL or DL distributions are high, then the test will indicate a potential weakness in the design as indicated in Figure 1.

Product reliability is a function of time, usually predetermined life time, t_L .

The cumulative normal distribution of the margin (difference of stress means divided by their common standard deviation) between the specified strength (use conditions) which is represented by the requirement and the reliability test level (RTL) determines product reliability. The test level and its duration are chosen so as to cause cumulative damage during testing corresponding to the degradation due to cumulative damage in the product's life span. The calculated value, produces product required reliability, which is then a quantitative measure.

A summary of listed tests and the mapping of their applications to the product life cycle is presented in Table 1.

Table 1 – Test types mapped to the product development cycle

Type	Design	Integration	Validation	Acceptance	Manufacturing	Services
A Qualitative	FMECA	HALT			HASS/HASA	
	Maturity Building		Maturity Confirmation			
B & C Quantative			Reliability Growth Test	Reliability Qualification Test	Reliability Production Acceptance Test	
	Maturity Assessment					
Product Breakdown structure Opportunity	Type B/C : Component					
	Type A : Component	Type A : Assembly an/or Subsystem				
		Type B/C : Assembly	Type B/C : System			

IEC 1379/13

Table 1 provides the users of this standard a synthesis in order to get a better understanding of the different methods as and when required during the whole life cycle product.

4.2 Classification, methods and types of test acceleration

4.2.1 General

Based on the cumulative damage model, the information expected from the test and the product use assumptions, the accelerated test methods may be divided into three groups:

- Type A: qualitative accelerated tests: for detection of failure mode and/or phenomenon;
- Type B quantitative accelerated tests: for prediction of failure distribution in normal use;
- Type C: quantitative time and event compression tests: for prediction of failure distribution in normal use.

NOTE Both B and C types of test may lead to test time reduction. Type B test should be performed based on particular failure mechanism, and generally it may be applied to lifetime acceleration. Type C test requires

research of usage or specific conditions' assumption before test. Type C test may be applied to failure rate acceleration.

4.2.2 Type A: qualitative accelerated tests

Type A, accelerated tests, are designed to identify potential design weaknesses and also weaknesses caused by the manufacturing process. They can therefore be induced at levels considerably higher, than OL, as shown in Figure 1, i.e.. The goal of this type of test is not to quantify product reliability, but to induce or precipitate, during the test, the product's overall performance issues which are likely to take place in the field some time during the product's useful life and result in a product failure. Improvement of the product design or manufacturing processes is executed to preclude those failures, producing a stronger or more robust product, expected to be more reliable in the field even under extreme or repetitive stresses as outlined in the design specifications.

Product development processes using this type of test increase product reliability through the mitigation of failure modes and by increasing product robustness without demonstrating a reliability target or measuring reliability improvement. These tests are often made with such high stress levels that, ideally, failures should be observed (DL in Figure 1) well beyond design specification limits. The purpose is to identify the failure modes, the weak links in the design and the margin between the functional limits, operating limit (OL) and the destruct limit (DL) in Figure 1. The margin between the specification limit and the operating limit ensures that the weaknesses are identified in HALT and are not expected to occur as failures during the expected product life, t_L .

4.2.3 Type B: quantitative accelerated tests

Type B tests use cumulative damage methods to determine product reliability projected to the end of the expected product life. The necessary margin between the expected cumulative damage and the requirement produces a reliability measure. These tests are then accelerated to achieve the required cumulative damage in considerably shorter time than the product's expected life. Type B accelerated tests use quantifiable acceleration factors which are based on the physics of specific failures (or failure modes) and provide a relationship between the exposure time to the specific stresses during testing and in use environment. The failure, or failure mode distribution, is determined from information gathered through separate accelerated tests. Such test information provides the basis for a functional life model and can be used to quantify test acceleration for various reliability calculations, as necessary and/or applicable. In this way, product reliability can be estimated through estimation of the reliability or probability of occurrence of individual failure modes for any level of expected stresses. If needed for data analysis using other test types (e.g. reliability growth or reliability demonstration tests), the determined test acceleration factor can be used to recalculate times to failure data from accelerated tests so as to represent times to failure occurrences in the use environment, and use the results for reliability calculations. In Figure 1, these tests are shown as reliability test levels (RTL).

Another way of getting information from this type of test is to test to failure samples of items for the specific failure modes and the specific environments. This permits determination of applicable failure distributions and appropriate acceleration factors which can then be used for calculation of the probability of occurrence of the particular failure mode. This information may be useful for future tests as well as Weibayes tests (1 parameter Weibull; see IEC 61649). The stress level of the Type B tests can be illustrated in Figure 1 as being higher than the requirement, but below the stress level that would be applied in HALT. The stress level can be between the design specification limit and the stress level of DL. The duration of the stress application shall be sufficient to cause cumulative damage with a margin over the cumulative damage produced by the expected life stresses during the product life. This margin then yields the measure of product reliability during the time t_L , $R(t_L)$.

Test time reduction is often achieved through an increase in operational or environmental stress beyond those specified for use. The increased level of these stresses produces a

cumulative damage effect equivalent to that expected in the product life, but in a considerably reduced time period.

Accelerated degradation test (ADT) is a method where the degradation of an item is measured as a function of time or stress cycles. The degradation is plotted and extrapolated until the parameter reaches an unacceptable level (Failure). This method is very useful for failures that are not sudden failures, but develop gradually. The stress levels applied in the test may be the nominal or worst case operating limits expected in the field use or the test may be accelerated by increasing test stresses as described in this standard [7].

4.2.4 Type C: quantitative time and event compressed tests

4.2.4.1 Use of Type C tests

Type C tests are mostly used for estimation of the life time of components where wear out in active use is the dominating failure mode; for example switches, keyboards, relays, connectors or bearings. The data from these tests are often analysed using the Weibull distribution, and often in the form of the so-called “sudden death test” (see IEC 61649).

Type C time compression tests are also often used to identify:

- system integration issues (such as software and hardware integration or interaction);
- failure modes that are specific to the operating state, e.g. operating cycles for any mechanical and electrical cycling event;
- failure modes specific for environments where the range of stress is broad, but there is a threshold defined such that stress exposures below the threshold will not contribute significant damage to the product.

With the time compressions or event compression, the stress is accelerated by the duration or frequency of its application but not by the increase of its level.

Each of the above accelerated test methods is further described in Clause 5.

4.2.4.2 Time compression

Time compression is a test acceleration that can be applied in some circumstances, where the tests take into consideration only the time that a product is actually operational or operating in a state that produces significant damage (also known as removal of “non-damaging exposures”). The circumstances in which this type of acceleration may be applied are those where the operational stresses and their cumulative damage are significantly higher than those in other operational modes, e.g. non-operational or standby, etc. To apply this rationale, the accumulated damage during the lower stress periods should be insignificant compared with the damage accumulated during the high stress periods, which physically may not be easily justified (see IEC 60605-2).

4.2.4.3 Event compression

When a stress is repetitious, such as ON/OFF cycling, then the test can be accelerated by speeding up the repetition of stress (event compression). This is especially useful in cases where the test cannot be accelerated by increasing the stress level itself. In this manner, the number of operations remains the same as does the effect of the cumulative damage. Care should be taken that the higher repetition rate of the stress does not cause failure modes that would not occur in normal operation. Examples are self heating in a plastic part, vibrations that do not dampen out before the next load and software sequences that do not finish before the next signal.

5 Accelerated test models

5.1 Type A, qualitative accelerated tests

5.1.1 Highly accelerated limit tests (HALT)

5.1.1.1 General

Each type of commonly applied accelerated test method is presented in this standard with its advantages, disadvantages and necessary application cautions.

Type A test is not only the classical HALT but also other highly accelerated test types such as the autoclave, thermal shock, and other quantitative accelerated tests.

The model shown in Figure 1 illustrates the relationship between the specifications, the design limits and the test strategies of the HALT.

NOTE The acronym HALT was inadvertently spelled out in the past as highly accelerated *life* test. By its nature of being a qualitative accelerate test, however, HALT does not measure the life of an item, even though the term "life" is implied by ensuring that the failures in HALT would not be experienced in the life of the tested item. The test effectively tests the strength limits of a product/item, thus the word "limit" is appropriately used in the spelled out acronym.

When reliability demonstration or reliability growth tests are accelerated, there is a need to demonstrate a margin between the cumulative damage induced by the applied stresses during testing and the cumulative damages caused by stresses expected to take place during the life, or any other predetermined time for which reliability is to be demonstrated. The favourable test results for the applied margins provide information on product reliability in that predetermined time as expressed by strength vs. stress criteria. Demonstrated strength is shown through the test results, while reliability is the complement of the area common to both, load and strength curves, shown in Figure 2 (the area common to both curves represents the area where a failure occurs).

In Figure 1 the requirement specifications are translated into design specifications. The figure further illustrates how the design margin is verified by the HALT.

In order to estimate the margin between the design specifications and the unit under test (UUT) it is necessary to increase the stress levels until failure occurs using Type A tests. The margins verified in these tests are illustrated by a HALT operating stress limit (OL), as well as a destruct limit (DL). This also indicates the margins for the variations in the materials and manufacturing processes during manufacturing.

5.1.1.2 Main principles of HALT

The methodology of HALT is to quickly precipitate failures to identify and mitigate design weaknesses in a product in order to increase robustness during the product field use. This type of accelerated test is not intended to measure, but to increase product reliability through the elimination of failure modes with the lowest margin between the field stress (load) and product strength (Figures 2 and 3). This type of accelerated test only identifies potential failure modes and guides the development and improvement processes for the chosen stressors. It is the experience from HALT that most products are very robust for the applied stresses, but that a few components or design details are significantly weaker than the rest. The idea of a HALT is to find those few components or design details and make them as strong as the rest of the product.

Figure 2 illustrates the interference between the strength and stress distribution. It is assumed that the stresses in the field from different applications, climatic conditions etc. can be modelled by a stress distribution. It is shown here as a normal distribution. The strength of the products will vary due to variations in raw materials and manufacturing processes. This can be modelled by a strength distribution which in Figure 2 is also shown as a normal distribution.

The area common to both stress and strength distribution, measures the probability of product failure. The graph in Figure 2 shows the classical design margin, stress vs. strength criteria, but in the context shown in this clause, it does not account for the cumulative damage model; therefore, it is not applicable to the initial short duration test that would measure the ultimate strength of the product design. Also, if the extensive product quality control maintains a very narrow strength distribution (which may be a very expensive and time consuming measure), then the distributions would not overlap, meaning that the field failures for the specific failure mode would be unlikely.

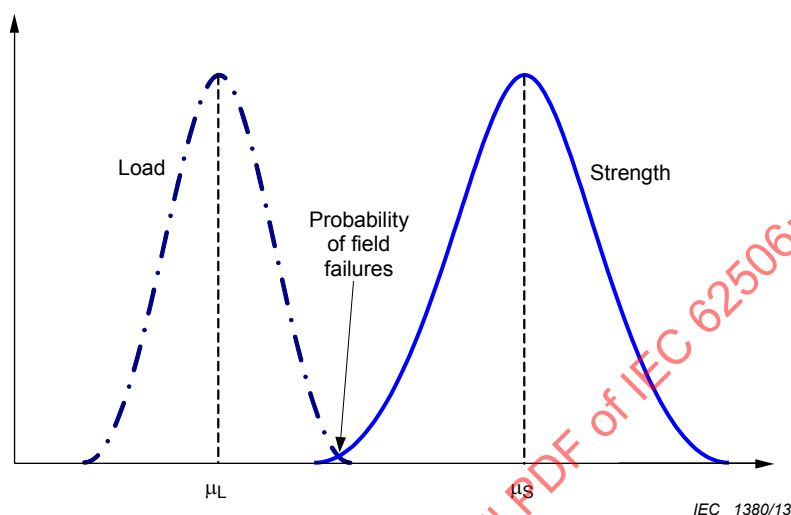


Figure 2 – Relationship of PDFs of the product strength vs. load in use

The manufacturing process, during production of the initial test units, is usually maintained under tight control, which may not be the case with the later continuous production runs. Figure 3 illustrates that the samples manufactured for testing are often of average strength or stronger, since they are often manufactured in a special prototype line with maximum management attention. Once the product is mass produced, the regular production items will be often weaker than the samples taken from the initial production. The rationale is shown in Figure 3. If the distribution of the first carefully produced samples were plotted as a function of stress, the low side of that distribution curve would fall at the place where the mean of the new distribution, H1 is located.

The narrow spread of this original distribution would make it far from the distribution of the expected load, shown as the distribution on the left. All of the items in that production run would have passed the test, i.e. there would be no failures detected. But with the later mass production, the strength mean becomes considerably lower, so that the overlap of the stress and the strength distribution becomes imminent; this would lead to failure of the units of weaker production under the field load. This means that the test would not adequately discover the potential weakness of the mass produced units. If the test level is higher (the mean approximately at the level H3 in Figure 3), and the product strength has a distribution that includes the regular production, such a test would provide a sufficient margin to ensure that the potential failures in use of the weaker units are detected and mitigated. In the cases where there is inadequate margin will cause failures in the field in later production.

This is the rationale behind the application of tests such as step-stress and HALT, to ensure an appropriate margin over the expected stresses in life is ensured. In this way, these tests can be performed on a considerably smaller number of test samples than needed for conventional testing.

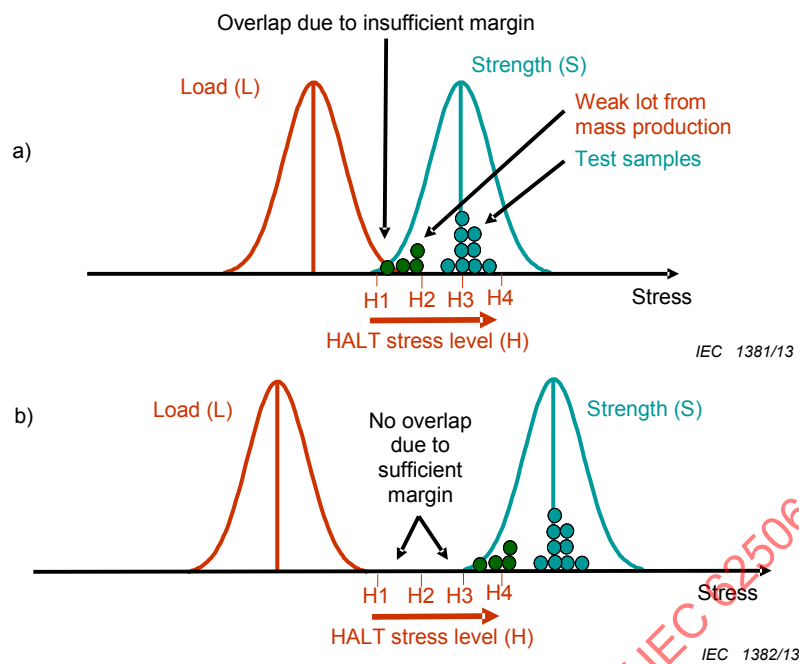


Figure 3 – How uncertainty of load and strength affects the test policy

HALT is an explorative, qualitative design improvement test and should be accepted as such. It identifies the weakest link failure mode in the design for the related stress type(s). If this failure mode is related to the stress in the product use environment, the stress levels can only be estimated by an engineering judgement, considering the margin between the load and strength curves and including the additional margin for the expected variations in both the manufacturing process and the expected use environment. The comparison between HALT and a conventional accelerated test is illustrated in Table C.1.

With the weakest link failing first, HALT is applied further to detect the second, third, and other consecutive weak links. This takes place until no more relevant failure modes are observed or until the technological limits of the tested system are reached.

HALT is designed to far exceed the product use environment as well as the design specifications. The stresses are applied in short durations, and the goal is to precipitate transition of faults into failures, and strengthen the product as much as it is economically and technically feasible. HALT identifies failure modes, but not their time dependency.

The UUT has to be functionally monitored during the test in order to detect the loss of its functions. If continuous monitoring is not possible, the product functions have to be tested while the stress level is kept constant. A typical procedure for a HALT is shown in Annex A.

The stress magnitude is not the focus of HALT; the real focus of an effective HALT program is on product improvement activities and organizational response to failures. The product improvement should be continued to the point of a cost-effective rugged product where no part of the design is significantly weaker than the rest of the product. The goal is to keep improving the product to the level justified by the business case and utilization of cost-effective technology.

The operating and destruct limits for the product can be pictured as distributions on a stress axis, as illustrated in Figure 4, for both stress extremes, high and low (LOL, UOL, LDL, and UDL).

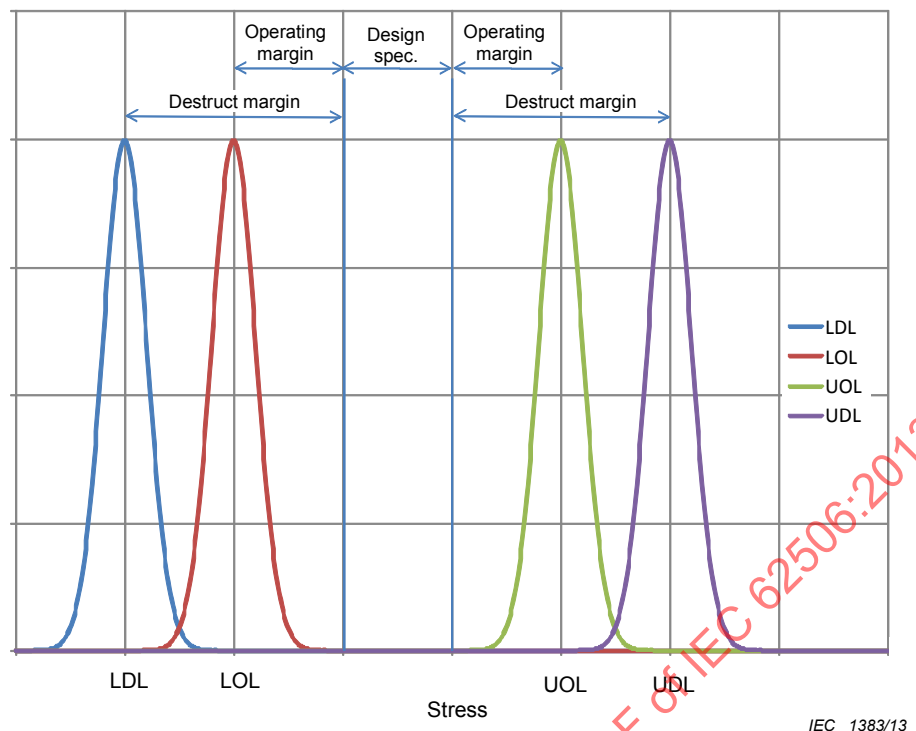


Figure 4 – PDFs of operating and destruct limits as a function of applied stress

Figure 4 is an example where both limits of the stress affect an item. This example could be the thermal stress where both, high and low temperature, affect the performance of the product. These effects may not be symmetrical, as the limits for high and low temperature may be at a different distance from the nominal design stress. Even though these tests are performed on early prototypes they can provide information on design related failure modes. As shown in Figure 4, all of these limits can vary as indicated by the distributions. These distributions may have different standard deviations, and to determine HALT is to give an indication of the margins that allows the final product to accommodate these variations without failures in the field.

Even though Figure 4 depicts the temperature stress, other stresses may also be successfully applied in a HALT. In the case of other stress types, lower limits may not exist as for example is the case for mechanical stresses, but they may exist with other stresses such as electrical stress and humidity.

5.1.1.3 Stress types and application

The primary or typically applied stresses in HALT are as follows:

- temperature;
- thermal cycling;
- vibration/shock;
- voltage;
- combination of vibration/shock and thermal cycling.

Other product-specific stresses can also be applied such as clock frequency for the microprocessor, voltage or power variations, contaminants or solvents, etc. or a combination of these.

Verification of margins and product improvements made in response to HALT serve to increase the probability that the product will be robust and reliable in the field.

An example of typical stress levels is shown in Annex A. Ideally, the HALT stresses are applied as described in 5.1.1.2 until the predetermined maximum stresses are achieved. These maximum stresses are determined as follows:

- by the material limits and technological limits of the used materials and components;
- by the maximum stress achievable with the available methods and equipment.

It should be noted that the applied stress levels should not exceed the ultimate material limits where the physical or chemical characteristics might change.

It is normal to expect that there are some fragile elements in the UUT that are not designed for the stress levels normally applied in HALT. Those fragile elements should if possible be protected during HALT or disregarded in the test data evaluation. Fragile elements may be protected for example by applying cooling air to them, by isolating them against cold air, by suspending them outside the UUT in order to isolate them from vibration and shock or even by moving them outside the HALT test chamber and extending their connections to the rest of the UUT.

Each failure observed during the HALT should be investigated and root cause failure analysis should be performed. If the identified failure mode is likely to occur in the field where the stress level is expected to be considerably lower than HALT, a corrective action should be proposed and implemented in accordance with engineering as well as management decisions.

5.1.2 Highly accelerated stress test (HAST)

This type of testing may be considered to be a cross between the qualitative, Type A, and Quantitative, Type B, tests. This test type is very popular in the electronic components industry where it is widely used as a more efficient (shorter) alternative to the much longer temperature humidity bias test (THB), i.e. a pressure cooker test, which has a duration of 1 000 h. The stresses in these tests consist usually of temperature and humidity where corrosion of vias (metal conductors) in dies and thin film resistors may occur. The components are normally voltage biased during the test. Even though these tests do not yield numerical reliability estimates, they are used as effective re-qualification tests to provide certainty that reliability of the components is not compromised by any changes introduced in the components, see JESD22-A110 [23]. The duration of HAST in the electronic component industry is usually about 100 h, and the stress levels for temperature and humidity are usually 130 °C and 85 % RH, respectively.

5.1.3 Highly accelerated stress screening/audit (HASS/HASA)

5.1.3.1 Principle and extent of HASS/HASA

HASS and HASA are not classified as tests. Yet, both are included in this standard because they apply accelerated stress for defect detection/screening. HASS tests are used for screening of production units using stresses considerably higher than those expected in normal use or in shipping, but with lower levels than those that might significantly reduce product life in the field. These levels are determined based on the finding from the HALT program. The screening may be performed on all (100 %) production units or on a sample. The purpose of screening is to detect any latent manufacturing defects that would eventually appear in the normal use of the product. Detection of latent defects, followed by failure analysis and necessary corrective action (verified through a test designed to detect the specific failure mode), reduces the number of faults. The resulting field reliability improvement is due to the reduction in the number of field components with latent manufacturing defects and not due to a change in the inherent design reliability.

The stress levels in the HASS/HASA are used for defect precipitation screening. The precipitation screen consists of combined stresses with their levels barely inside the operational limits. The purpose of this screen is to precipitate manufacturing defects into intermittent or permanent failures. To detect the failures, it is recommended to monitor the functions of the UUTs during screening as some operational abnormalities may not be

discovered in the post test operational checks. Further, it is not known when during the precipitation screening the possibly intermittent functional failure may be detected. The precipitation screen may combine several different stress types and stress levels. As with HALT, intermittent failures can be verified by using a detection screen (see Clause A.1, Step 4). Constant monitoring should provide functional coverage that is as complete as possible. Coverage and effectiveness of the monitoring should be optimized prior to beginning of the screen development process. The monitoring process should facilitate root cause analysis.

A typical precipitation screen itself will require a relatively short stress application time such as from 3 min to 1 h of stress. Additional time will be required for the test and monitoring equipment set up.

HASS is ideally suited to pilot production or production ramp-up, i.e. when production rate is slow and 100 % screening may easily be accomplished. HASS may continue during normal production for very critical products that are manufactured in small volumes.

HASA is a process monitoring tool where a sample from a production lot is exposed to the precipitation screen to detect possible defects. HASA is often performed before the production lot is released. HASA often supplants HASS when the manufacturing process reaches its maturity. HASA is further reduced and even eliminated when the effectiveness of production controls is established.

5.1.3.2 Selection of stresses and their magnitudes

Stresses should be selected so as not to compromise functionality, material properties, or the life of non defective hardware. The initial levels are determined from information gained in HALT.

The precipitation screen is performed with stress levels a little lower than the operating limits since the UUT have to be monitored for function during screening. Typically, the temperature stress is reduced by 5 °C and the vibration level by 2 g r.m.s. (19,62 m/s²). Before the precipitation screen is used for HASS/HASA it should be verified that the precipitation screen does not significantly reduce the product life in the field. This can be tested, for example, by exposing one sample to the precipitation screen 10 times.

5.1.4 Engineering aspects of HALT and HASS

5.1.4.1 Advantages of HALT and HASS

The advantages of HALT and HASS are as follows:

- verified and selectively increased design margins for reliability improvement;
- sample size for determination of a specific failure mode is small;
- quick determination of dominant failure modes for specific stressors and easily combined stresses (the duration of the test is typically 3 days);
- efficient trade-off analysis information and determination of necessary corrective actions;
- quick verification of corrective actions
- efficient short-term production screening;
- elimination of weak or defective components (HASS) from the main population (quality and reliability improvement).

5.1.4.2 Disadvantages of HALT and HASS

The disadvantages of HALT and HASS are as follows:

- a) possibility of stimulating failure modes that would not normally be observed in product use;
- b) potential for over-improvement of design margin (over-design);

- c) resultant reliability not known;
- d) no statistical confidence in the test result (over- or under-estimation of the design margins);
- e) testing does not address all interactive effects of multiple failure modes;
- f) impractical for large products, small products and products with diverse fragility;
- g) limited number of stress types (primarily temperature, vibration, shock and thermal cycling);
- h) inability to evaluate the design limits for a stress influenced by synergy with other stress types not provided by the HALT types.

5.2 Type B and C – Quantitative accelerated test methods

5.2.1 Purpose of quantitative accelerated testing

The purpose of quantitative accelerated tests is to estimate one or more measures of reliability, e.g. failure rate, probability of failure or survival, or time to failure (TTF). Often the purpose of quantitative accelerated testing is to determine the life time of components with a limited life (wear out), or to determine (quantify) and improve the reliability of systems and components. For this, Weibull analysis is very useful (see IEC 61649).

5.2.2 Physical basis for the quantitative accelerated Type B test methods

5.2.2.1 General

The goal in accelerated testing is to measure the reliability and verify acceptable reliability performance of the product within a short period of time. Thus, the goal in accelerated testing is to accelerate the damage accumulation rate for relevant repetitive stress and wear out failure mechanisms (a relevant failure mechanism is one that is expected to occur under life-cycle conditions).

In order to accelerate tests, it is necessary to have a thorough understanding of the potential failure mechanisms and the operational and environmental stresses of the product or system. This can also be achieved through failure mode analysis of the designed product associated with the intended product usage profile, e.g. using a FMEA (see IEC 60812 [2]). Effective measures can then be taken not only to prevent their manifestation under predetermined life or usage stresses, but also to precipitate them effectively during accelerated testing for product improvement. Accelerated wear-out or reliability testing has been recognized to be a valuable activity to assess the reliability of high reliability electronics, electro-mechanical and mechanical systems. The application of elevated stresses is usually for the purpose of:

- a) making the design more robust and improving the manufacturing process through systematic step-stress testing and increasing the stress margins through corrective actions (reliability growth testing);
- b) conducting accelerated life tests in the laboratory to measure and verify in-service reliability.

The extent of acceleration, usually termed the acceleration factor (AF or A), is defined as the ratio of the life under use conditions to that under the accelerated test conditions. This acceleration factor is needed to quantitatively extrapolate reliability measures (such as time-to-failure and failure rates) from the accelerated test environment to the usage environment, with some reasonable degree of confidence. The acceleration factor depends on hardware parameters (e.g. material properties, product architecture) of the UUT, usage stress conditions, accelerated stress test conditions and the relevant failure mechanism. Thus, each relevant failure mode (assuming it is a result of one failure mechanism) in the UUT has its own acceleration factor and the test conditions (e.g. duty cycle, stress level, stress history, test duration) shall be tailored based on these acceleration factors.

The physics of failure approach means that each failure mode is addressed separately and the margin to the life time or to the required reliability is verified for each of them. In some

cases the result is kept qualitative. With this approach, each of the failure modes has its own failure distribution and failure rate. In other cases, the result is combined to an estimated reliability for the whole product.

When planning a test the potential failure modes in the item should be listed. The test is then planned with stress levels and durations so that the failure modes should be observed in the test if they are present in the product. For this planning, empirical factors from previous products, from the component suppliers or from literature, can be used to estimate the acceleration factor of the test. After the test is performed the actual failure modes are known, and the test can be analysed for each failure mode separately. It is recommended to use a test setup where the empirical factors can be estimated from the test itself. See Annexes F and G.

Type B tests can be run by increasing the level of a variety of loads such as thermal loads (e.g. temperature, temperature cycling, and rates of temperature change), chemical loads (e.g. humidity, corrosive chemicals like acids and salt), electrical loads (e.g. steady-state or transient voltage, current, power), and mechanical loads (e.g., quasi-static cyclic mechanical deformations, vibration, and shock/impulse/impact). The accelerated test environment may include a combination of these loads. Interpretation of results for combined loads and extrapolation of the results to the life-cycle conditions requires a quantitative understanding of the relative interactions of the different test stresses and the contribution of each stress type to the overall damage.

5.2.2.2 Advantages of the Type B test

The acceleration stress test provides quantitative information on the reliability of the tested product:

- this test type can be designed
 - for selected failure modes (e.g. from FMEA) to assess, with reasonable confidence, overall reliability;
 - for combined stresses also to simulate the interactive effects of those stresses and a realistic assessment of the product reliability;
- an acceleration test can be effectively carried out to enable the test to represent cumulative damage in use

5.2.2.3 Disadvantages of the Type B test

- a risk that the stress acceleration may exceed the physical properties of product materials and cause unforeseen damage;
- a risk that the acceleration of combined stresses may cause additional unforeseen damage to the product that would not have happened in actual use;
- the base line for acceleration testing is not a single stress but is generally a multiple stress that varies with user and location. This needs to be taken into consideration when quantifying the results;

5.2.3 Type C tests, time (C_1) and event (C_2) compression

5.2.3.1 Type C_1 tests

5.2.3.1.1 General

Time compression is achieved by eliminating “OFF-time” (e.g. non-operating time) by compressing the duty cycle through addressing just the ON time. Furthermore, when products are exposed to a wide range of stresses, it is typical that the highest stresses (the primary stresses) will induce the most damage, and that there are some levels of usage stress that, compared to the primary stresses, are assumed to produce negligible damage. Any exposure below a chosen damage threshold stress can be assumed to produce negligible damage and can be eliminated from the test program. This is particularly true for mechanical fatigue and is often applied in accelerated structural fatigue testing (see IEC 60605-2).

An example of duty cycle compression is when the test duration is 24 h per day, whereas the product in its actual use environment, operates for only 8 h per day. This results in a time compression factor of 3. Each day of test time is equal to 3 days of actual use time.

5.2.3.1.2 Advantages of time compressed tests

Products with a minimal or short operating use time compared with calendar time can be tested within a very reasonable test time relative to its required life (e.g. office equipment, cars, harvesting machinery, etc.). For example, a snow plough is used only in one season, once a year, and only when there is a reasonable accumulation of snow to justify its use. Even when used, it is expected to be on for 2 h to 3 h on average. There are several primary damaging stresses such as vibration, stress in the motor, wear out of blades, etc. For the rest of the year, it is stored in a shed, and protected from extreme weather conditions. Thus a snow plough that has a required life of ten years, but effectively is used four times a month for three months, for duration of 2 h, can be tested for required usage duration of 240 h. Therefore, a test of approximately 300 h would provide a good margin to prove the snow plough's reliability.

With a relatively short test duration at nominal stresses, there is no reason to increase the stresses, and therefore, there is no need to determine stress acceleration factors; otherwise there is a risk of overstressing the UUT.

5.2.3.1.3 Disadvantages of time compressed tests

Concentration exclusively on operational time means considering the operational environment only with its associated failure modes, while the failure modes occurring in the "non-operational" environments may be neglected. Such failure modes could even be more damaging to the product, since they are a result of stresses that are perhaps considerably lower than those when the product is in use, but are applied for considerably longer time to produce the same or greater cumulative damage than the stresses applied in use.

Considering the same example of the snow plough, there are 87 600 h in its ten year lifespan when the snow plough is exposed to extreme cold temperature for approximately 20 000 h, leading to the failure mode of embrittlement of materials; very high temperatures for approximately 6 000 h, leading to ageing of plastic parts, paint, adhesives, thermal cycling; approximately 7 200 cycles causing multiple structural damage; and humidity, applied for a minimum 30 000 h per year, causing corrosion. Testing only under operational conditions would disregard the influence of non-operating environments.

For products where active time is considerably shorter than the passive (OFF time), it is necessary to combine time accelerated testing for the operational periods with tests that accelerate the passive periods, e.g. corrosion tests, humidity tests etc. In some cases the product can be preconditioned before the time compressed tests by applying some stresses from the passive periods, for example moisture, cold storage, solar radiation or mechanical loads like vibrations and shocks simulating the non operating conditions. The purpose of such preconditioning is to simulate the inter-relationship of the failure modes of active use with the failure modes expected in storage, which in turn highly affect the failure modes in use. As an example, corrosion of the snow plough would highly affect influence of applied vibrations on the product structure.

5.2.3.2 Type C_2 tests

5.2.3.2.1 General

The event compression tests apply repetitions of events with considerably higher rates than those applied in actual product use. As an example, the ON/OFF cycling of the above-mentioned unit (the snow plough) can be compressed to a test of several h, by applying the ON/OFF cycling repeatedly. Therefore, the 120 required ON/OFF cycles in the 10-year life with a sufficient margin to demonstrate reliability would be a very short test.

Type C_2 tests can be combined with the time compression tests for further test acceleration. This may result in a very short test with “high reliability” demonstration, however, several important precautions shall be taken when carrying out this combined acceleration. For example, the rapid application of repetitious stresses may influence test results by varying cumulative damage.

The event compression tests may also be combined with the stress acceleration tests to further shorten the test time. Caution should be exercised when preparing such tests, as the time compression may influence the stress acceleration. For example, fast ON/OFF cycling results in a very short time in the OFF condition, which does not then allow the UUT to properly cool down. This can then result in additional thermal acceleration of the UUT's degradation and precipitation of failures. Also, this type of acceleration may neglect the failures due to non-use, such as material deterioration.

5.2.3.2.2 Advantages of the type C_2 test

The advantage of the Type C_2 test is that in a short time, by speeding up the stress repetition, the cumulative damage can be reproduced within a much shorter time than in regular use.

5.2.3.2.3 Disadvantages of the type C_2 test

This type of testing may also produce some negative effects by applying continuous stress and in a manner that precipitates failures that normally would not occur. For example, in mechanical parts with a wear-out mechanism induced by friction during operation, continuous friction may produce heat that would further precipitate a failure that would normally be delayed by periods of cooling. Another example could be the metal fatigue caused by stress repetition, if applied without allowing time for the material relaxation.

5.3 Failure mechanisms and test design

The importance of correct failure analysis shall be strongly emphasized. Understanding the failure mechanisms is essential for designing and conducting successful accelerated life test or other test as advocated in physics-of-failure based reliability design and prediction methodologies (provided that the predictions are done using the physics of failure approach). To achieve this, a rational method shall be identified to relate the results of accelerated tests quantitatively to the reliability or failure rates in use conditions, using a scientific acceleration transform. The amount of test-time compression achieved in an accelerated test shall be determined quantitatively, based on the physics of the relevant failure modes. Accelerated life tests attempt to reduce the time it takes to observe failures. In some cases, it is possible to do this without actually changing the equation for the instantaneous failure rate. However, if the hazard function changes, it is termed a “proportional hazard model.” Mathematically, the differences between these two can be seen in the following two equations for a Weibull distribution in which $H_{AL}(t)$ is the cumulative hazard function for accelerated life, $H_{PH}(t)$ is the cumulative hazard function for the proportional hazard model, AF is an acceleration factor due to some sort of stimulus and $(t/\eta)^\beta$ is the unmodified cumulative hazard for a Weibull distribution (t = time, η = characteristic life and β = shape parameter).

$$H_{AL}(t) = \left(\frac{AF \times t}{\eta} \right)^\beta \quad (1)$$

$$H_{PH}(t) = AF \times \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \quad (2)$$

In $H_{AL}(t)$, there is a linear relation between time and the acceleration factor. In $H_{PH}(t)$, the hazard function itself is being modified. By rearranging the equation for $H_{PH}(t)$, it can be seen that there is a non-linear relation between time and acceleration factor. The difference between these two types of accelerated tests is that $H_{AL}(t)$, requires knowledge only of the

ratio of the actual test time to calendar time (non-accelerated time) caused by the applied environmental stimulus whereas $H_{PH}(t)$, requires knowledge of the manner in which the AF changes as a function of the parameter β . For the Weibull distribution, of which the exponential distribution is a special case, the resultant distribution for either of these two conditions is still a Weibull distribution.

Equation (1) is usually applied when the acceleration is made with the increased repetition rate of the applied repetitious stress such as operational cycling. Equation (2) is preferred when the acceleration is applied to the physical states of the unit under test such as thermal acceleration (Brown's motion), where the acceleration factor itself depends on the distribution.

To summarize the above rationale, it can be said that the stress acceleration provides reduction in time to failure by increasing the stress levels beyond those expected in the normal use of the item.

5.4 Determination of stress levels, profiles and combinations in use and test – stress modelling

5.4.1 General

It is equally important to understand the operational and environmental stresses that generate the failure mode based on physics of failure. This stress modelling serves as the base point from which acceleration occurs. How this baseline is handled is extremely important when the stresses will vary depending on product use.

5.4.2 Step-by-step procedure

The following procedure shall be applied:

- a) identify the relevant stress factors from the field, including storage and transportation (see the IEC 60721 series);
- b) determine which stress types have to be accelerated, which will be nominal and which can be omitted, e.g. because they are covered by other tests;
- c) determine if the stresses can be applied simultaneously to include stress interactions or whether they will have to be applied sequentially, e.g. in a test cycle (see IEC 60605-2);
- d) determine if the acceleration factor (A) can be estimated from the test or estimate the acceleration factors based on relevant acceleration equations and relevant empirical factors;
- e) determine the sample size (see IEC 61649, IEC 61123 and IEC 61124);
- f) perform the test (see IEC 60300-3-5);
- g) perform failure analysis;
- h) analyse the test – each failure mode separately (see IEC 61649, IEC 61710 and IEC 61124);
- i) report test result (see IEC 60300-3-5).

5.5 Multiple stress acceleration methodology – Type B tests

In cases where two or more stresses are the cause of reactions affecting the component or product life (reliability), the test acceleration is made by increasing each individual stress using models appropriate for those stresses. In these cases, failure rates representing each of the failure mechanisms are individually accelerated and the overall reliability (R) or failure probability (F) shall be estimated separately. This can generally be expressed as follows:

$$R = \prod_{i=1}^{N_s} R_i \quad (3)$$

where

R_i represents influence of a stress i on reliability of UUT when stresses are independent;

R represents the reliability of UUT;

N_S is the total number of independent stresses.

The specific case of competing risks is described in Annex G to IEC 61649:2008.

If the time to failure of all the components or items can be modelled by the exponential distribution this can be simplified as follows:

$$\lambda_{\text{item}}(\text{Stress}) = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_S} \lambda_i(\text{Stress}_i) \quad (4)$$

where

λ_U is the unknown failure rate.

In the case of Weibull distribution where all of the failure modes distributions have the same shape parameter, the scale parameter of an item under combined stresses is as follows:

$$\frac{1}{\eta_{\text{Item}}^\beta(\text{Stress})} = \frac{1}{\eta_U^\beta} + \sum_{i=1}^{N_S} \frac{1}{\eta_i^\beta(\text{Stress}_i)} \quad (5)$$

where

β is the shape parameter of the Weibull distribution;

η_{Item} is the item scale parameter for the combined individual stresses;

η_b is the base scale parameter;

η_i are the individual stress scale parameters.

For different shape parameters, the resultant distribution may be different to Weibull and the complexity of the relationships increases beyond the scope of this standard.

It is to be noted that the Weibull rationale may be used only when accelerating single failure modes because it expresses dependency of times to failure, as Weibull modelling is not applicable to the mix of different failure modes. Times to failure are not related in the case of different failure modes, not even if applied to a single component.

Equation (3) presents a rather accurate way of expressing the overall item failure rate with applied stresses. It assumes that the part/component failure rate is a sum of a basic failure rate, resultant from undetermined failure modes related to the part inherent defects, and of failure rates attributed to the failure modes sensitive to particular stresses and accelerated by them. Then, failure rates representing individual stresses can be determined by separate stress tests. Individual stress accelerations then apply to each of these stress-relevant failure modes.

If each stress type accelerates one and only one failure mode, the acceleration factor will influence each failure mode separately. With the assumption that the exponential distribution is applicable, which is the case when assemblies and systems are tested for multiple different failure modes, the item failure rate as accelerated is:

$$A \cdot \lambda_{Item} = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_S} A_i \cdot \lambda_{Item}(Stress_i) \quad (6)$$

Dropping the λ_U , which is small in regards to all failure modes' rates of occurrence, and having in mind that more than one stress may accelerated the same failure mode the test acceleration from Equation (6) becomes Equation (7):

$$\lambda_A = A_{Test} \cdot \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \lambda_i \right) \quad (7)$$

where

λ_0 is the failure rate that the item has in its use conditions;

λ_A is the accelerated, test, failure rate;

A_i is the acceleration factor for each of the increased stresses in test;

$\left(\prod_k A_k \right)_i$ is the product of acceleration factors of stress, i , affecting the failure mode k ;

λ_i is the failure rate of the item corresponding to the specific stress.

N_S is the number of stresses;

A_{Test} is the acceleration factor of the failure rate of the item in use conditions to produce the overall accelerated, test failure rate.

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad (8)$$

If the failure rate λ_i is defined in terms of reliability at a predefined time t_0 , $R_i(t_0)$ then the test acceleration is:

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (9)$$

If all stresses influence all failure modes, the resulting acceleration factors (A_i) can be multiplied. Then the easier or simpler way of calculating the total part failure rate could be in a form of its base failure rate modified by multiple compounded environmental stresses:

$$\lambda_{Item}(Stress) = \lambda_U \cdot \prod_{i=1}^{N_S} A_i \quad (10)$$

Equation (10), although widely used in the industry, assumes that each applied stress accelerates the base failure rate, and the next applied stress accelerates the total failure rate accelerated by the previous stress, and so on. This simplistic approach may lead to overestimation of effects of multiple stresses, as the failure mechanisms are different, and some are not accelerated by all of the stresses.

The result of overestimation of acceleration is overestimate of the probability of failure or leads to tests that are unreasonably short and inadequate

The best way to calculate realistic test acceleration is to investigate what stresses do influence the same failure modes in which case they can be multiplied.

5.6 Single and multiple stress acceleration for Type B tests

5.6.1 Single stress acceleration methodology

With this methodology, test acceleration is accomplished with a single stress only. These models are life stress models, where the damage per unit time of test is appropriately accelerated by increasing the level of stress.

The three most frequently used relationships are

- inverse power law model, used for test acceleration when stresses other than constant temperature are considered, such as electrical, mechanical, chemical (corrosion) and others,
- Arrhenius reaction rate model, used for constant temperature stresses, based on the effect that the absolute temperature has on a failure mechanism;
- Eyring model which is used in cases where the acceleration is achieved with temperature and moisture stress levels. The model is derived from quantum mechanics.

With all acceleration models, test data can be analysed using established analytical models to determine characteristic accelerated life parameters. Using the acceleration factors, the parameters corresponding to use environments are determined and used for reliability projections as needed. The acceleration models should if possible be verified by plotting the test data.

5.6.1.1 Inverse power law

The inverse power law is applicable to:

- dynamic stresses such as shock (any pulse type) and vibration (sinusoidal and random);
- climatic stresses such as thermal cycling, temperature changes (shock and thermal cycling), humidity, solar radiation, or any other climatic stresses with cumulative damage.

The inverse power law model is very simple to understand and use, and is very easily adaptable to any failure distribution. Graphical solutions (best fit by eye) are possible, and the parameters can also be determined using maximum likelihood methodology [10].

With the inverse power law, the characteristic that represents product reliability related to time, such as characteristic life, mean life, mean time to a failure, is represented as:

$$L(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad (11)$$

where

S is the stress;

C is the constant (>0) to be determined;

m is the parameter dependent on stress behaviour, also to be determined;

$L(S)$ is the life or other predetermined time duration as a function of stress.

The power law model is simple when expressed or plotted in logarithmic form, where it becomes a straight line with the slope representing the value of parameter m , and the value of the intercept with the y-axis is a function of the constant C :

$$\ln[L(S)] = -m \times \ln(S) - \ln(C) \quad (12)$$

The inverse power law is applicable to all distributions regularly used in reliability.

The test acceleration factor is then:

$$A_{S_IPL} = \frac{L(S_{Use})}{L(S_{Test})} = \frac{C^{-1} \cdot S_{Use}^{-m}}{C^{-1} \cdot S_{Test}^{-m}} = \left(\frac{S_{Test}}{S_{Use}} \right)^m \quad (13)$$

where

A_{S_IPL} is the acceleration of stress by inverse power law;

$L(S_{Use})$ is the life as a function of stress in actual use;

$L(S_{Test})$ is the life as a function of stress applied in test.

In the equation above, the subscripts “test” and “use” denote accelerated test condition and non-accelerated use condition, respectively.

Parameter C in the test acceleration cancels out, but the parameter m shall be determined for the item and the stress type.

If not readily known, the parameter m can be determined through tests performed on the same component or item at various stress levels to failure (Annex F). The test data is analysed then to determine the distribution and the distribution parameters. The parameter of that distribution that corresponds to the life is then plotted as a function of stress in log-log coordinates, and the slope of the straight line determines the value of the parameter m while the negative intercept will produce the value of the constant C .

This process that appears easy when described may become a very tedious process for items that are more complex than a single component, as the test may involve long periods of time and large number of samples. However, using test acceleration factors that are loosely estimated may lead to large errors in design of accelerated tests.

When extrapolating the stress-life curve well beyond the test points the predicted stress life curve may represent a more conservative estimate of life since the actual stress-life curve for the specific failure mode may exhibit a lower slope.

The Inverse power law is usually applicable to thermal shock, electrical and mechanical stresses (static and dynamic) and to humidity.

When accelerating a component life test with a specific stress, failures should be understood and grouped together for the same failure modes to ensure that the applied stresses are generating the same failure mechanism. For example, an accelerated test of a chip ceramic capacitor with nickel electrodes by voltage increase may exhibit two different failure mechanisms: dielectric breakdown, and movement of oxygen vacancies, both resulting in shorting of the capacitor. The two may appear as the same failure mode as the two mechanisms would not be distinguished if the failures were not analysed. One of the indicators of presence of two different failure mechanisms could be a resultant bimodal Weibull distribution (see IEC 61649).

Confidence limits on parameters, life functions and reliability for each of the distributions can be determined with appropriate statistics, as described in for example IEC 61649. Care should be exercised when applying statistical limits for the stress-life curve as, due to small sample size, the resultant extrapolated stress-life curve may be incorrect.

5.6.1.1.1 The advantages of the inverse power law model

The primary advantage of his model is its simplicity and easy determination of the parameters from a test, provided that there is an easy separation between failure modes. Another advantage is that it is widely used so that the specific parameter values can be found in abundant literature.

5.6.1.1.2 The disadvantage of the inverse power law model

The model disadvantages are as follows:

- the simplicity of the model may lead to errors in fitting life-related parameters of different distributions;
- often, due to time and cost constraints, it is not possible to determine the inverse power law parameters, hence common average values that can be misleading are used;
- tests to failure, to be statistically defensible, require a large number of samples to be tested to failure at each of the chosen stresses. Components at lower stresses may require a long test time, and should those at the same time have a high level of reliability, the sample size may need to be large, and the test may be lengthy;
- caution should be exercised when accepting an assumed value for the parameter m , borrowed from a seemingly similar product.

5.6.1.2 Arrhenius model

The Arrhenius model is based on expressing the reaction rate as a function of the component type and its failure mode and the absolute temperature, T . This model assumes that the reaction rate is exponentially dependent on the absolute temperature.

The reaction rate is expressed as follows:

$$\rho(T) = K \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T}} \quad (14)$$

where

K is the constant (not a function of temperature);

E_a is the activation energy (eV);

k_B is Boltzman's constant = $8,617385 \times 10^{-5}$ eV/K;

T is the absolute temperature (K);

$\rho(T)$ is the reaction rate as a function of the absolute temperature.

A function that represents reliable life is expressed as a function of temperature:

$$L(T) = C \times e^{\frac{D}{T}} \quad (15)$$

To represent the above equation as a straight line:

$$\ln[L(T)] = \frac{D}{T} + \ln(C) \quad (16)$$

where

T is the variable absolute temperature measured in degrees K (absolute temperature);

D is the slope of the straight line ($=E_a/k_B$);

$\ln(C)$ is the intercept of the straight line with the Y axis.

The acceleration factor is then found for the use with respect to test environment as the ratio of the two reaction rates:

$$A = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} = \frac{K \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}}}{K \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_0}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (17)$$

The failure rates as a function of absolute temperature, T , can be correlated to the failure rate at a specified absolute temperature, T_0 , as follows:

$$\lambda(T) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}} \quad (18)$$

The failure rate λ_0 at a specified temperature T_0 is:

$$\lambda_0(T_0) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_0}} \quad (19)$$

Division of Equations (18) and (19) will provide the following relationship:

$$\lambda(T) = \lambda_0(T_0) \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (20)$$

where

T_0 and T are the absolute temperatures in use and test environment, respectively.

An example of use of Arrhenius model for determination of value of failure rate λ_0 which at the temperature of 25 °C (298 K) was 1×10^{-8} failures/h, as a function of absolute temperature, T , is shown in Figure 5.

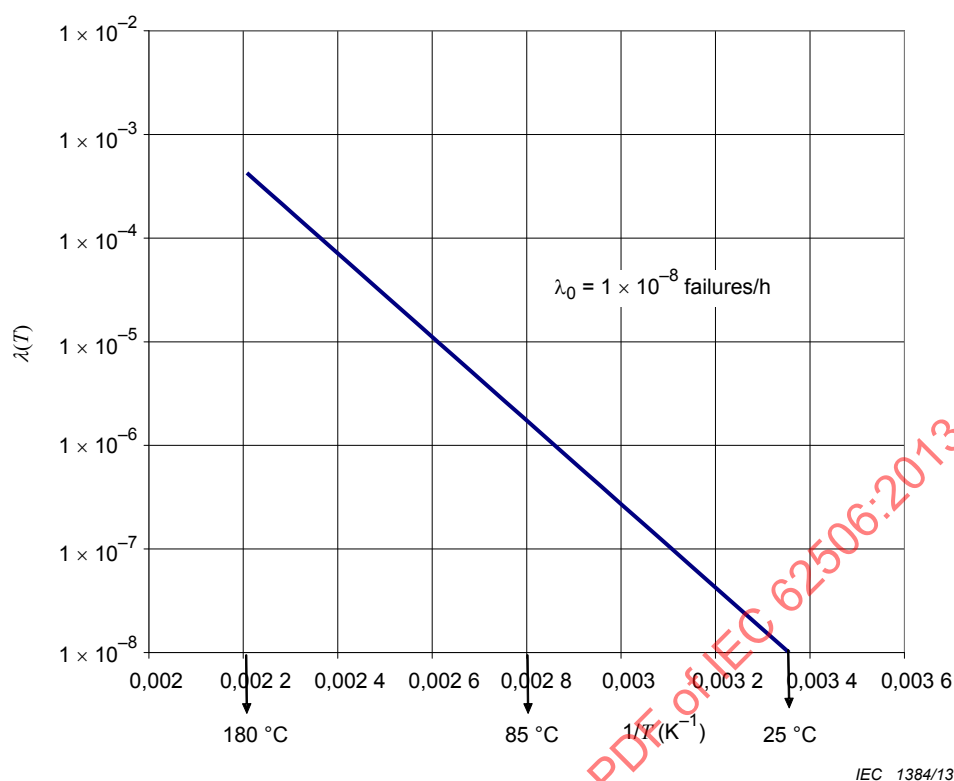


Figure 5 – Line plot for Arrhenius reaction model

The parameter E_a (activation energy) should be known for application of the Arrhenius model. The activation energy can be estimated as described in Annex D, but this is very time consuming. Component manufacturers estimate the activation energy for the relevant failure modes each time they qualify a new component technology. The estimate is often made on test structures and not on functioning components. The estimated activation energy is then applied to all components using the qualified technology. Therefore, the component supplier will usually be able to state the activation energy for the dominating failure modes of a given component.

Activation energy can be determined from the plot in Figure 5 by solving the equation used for the failure rate plot for E_a as follows:

$$E_a = k_B \cdot \frac{\{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)\}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (21)$$

$$E_a = k_B \cdot SLOPE$$

where

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1 \times 10^{-8} \text{ failures/h;} \\ \ln(\lambda_0) &= -18,421; \\ T_0 &= 25 \text{ °C} = (25 + 273) \text{ K} = 298 \text{ K} \\ \ln(\lambda_F) &= -7,764 \text{ 5;} \\ T_F &= 180 \text{ °C} = (180+273)\text{K} = 453 \text{ K;} \\ E_a &= 0,8 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$SLOPE = \frac{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}$$

Figure 6 shows determination of the activation energy.

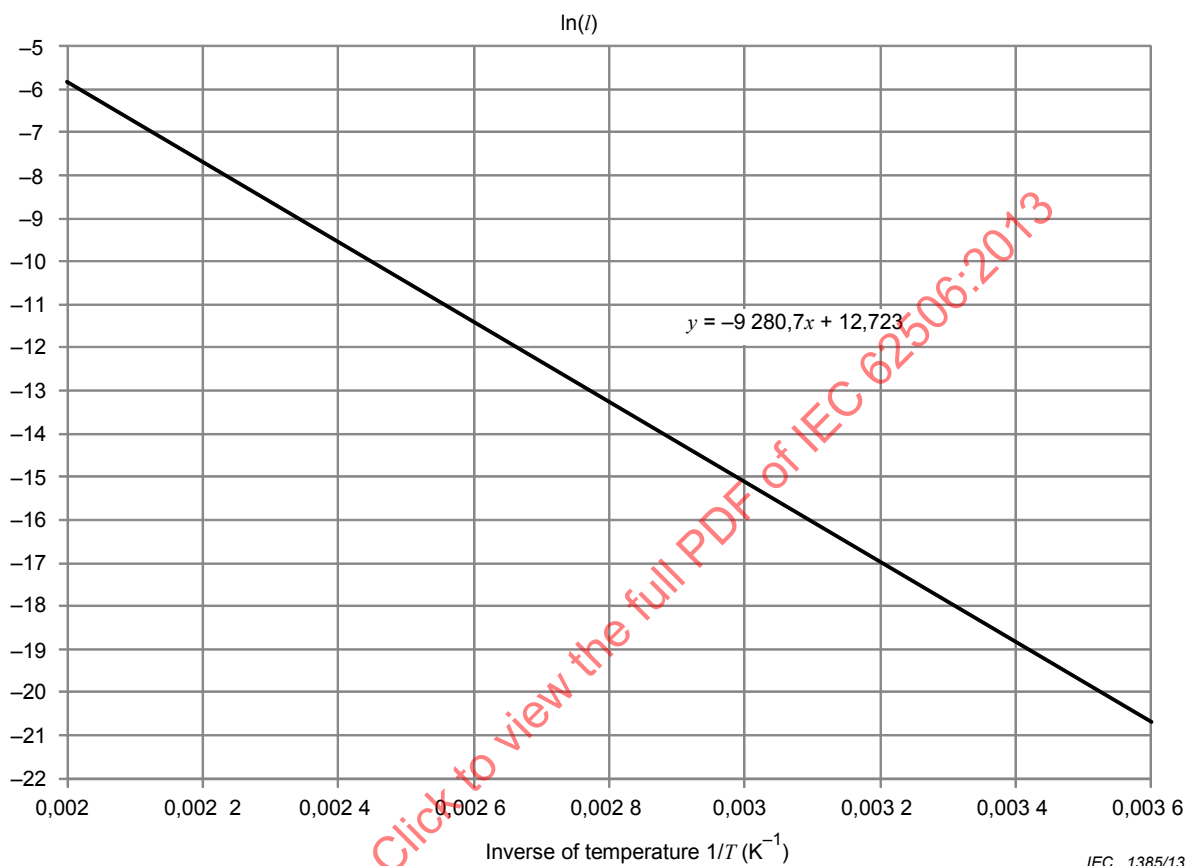


Figure 6 – Plot for determination of the activation energy

The Arrhenius method is applicable to a multitude of statistical distributions used in reliability analysis.

Confidence limits on parameters, life functions and reliability for each of the distributions can be determined with appropriate statistics.

5.6.1.2.1 Model applicability

This model is applicable to the circumstances where the thermal exposure in form of constant high temperature is expected to cause cumulative damage of materials thus changing their physical properties. Change of physical properties may then be demonstrated as a change in electrical and other specific properties.

The model is not applicable for damages caused by low temperatures. For these, it is advised that tests to failure be used to establish the specific model.

5.6.1.2.2 Model advantages

The Arrhenius model is simple to use and, when the failure mode is truly only dependent on the absolute temperature, can produce realistic test acceleration.

5.6.1.2.3 Model disadvantages

The model is easy to apply for single components provided that their failure rates are indeed dependent on and activated by temperature. For assemblies made of various electronic and mechanical parts, the model may be hard to apply, as the components will often have different thermal activation energies for different failure modes (see JESD85 [26] and Annex G of IEC 61649:2008).

5.6.1.3 Eyring model

As with the Arrhenius model, the Eyring model is primarily used when thermal stress is a factor in process acceleration. Unlike the Arrhenius model, the Eyring model is also used for stresses other than temperature, such as humidity, or some chemical reactions.

The function related to expected life is shown as follows:

$$L(S_E) = \frac{1}{S_E} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_E}\right)} \quad (22)$$

where

A and B are the function parameters that need to be determined through test or approximated by values from literature, e.g. IEC 60605-7 [14]. Parameter B may be a constant, but more often it is a function of some stress, normally temperature;

S_E is the stress as used in this model (usually absolute temperature measured in degrees Kelvin);

$L(S_E)$ is the measure of life such as MTTF, characteristic life, half life, etc.

The acceleration factor with this model is:

$$A_{S_E} = \frac{L(S_{E_Use})}{L(S_{E_Test})} = \frac{\frac{1}{S_{E_Use}} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_{E_Use}}\right)}}{\frac{1}{S_{E_Test}} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_{E_Test}}\right)}} = \frac{S_{E_Test}}{S_{E_Use}} \cdot e^{B \left(\frac{1}{S_{E_Use}} - \frac{1}{S_{E_Test}} \right)} \quad (23)$$

where

S_{E_use} and S_{E_test} are stresses in use and test, respectively;

B is a constant that needs to be determined through test or approximated by values from the literature [10].

The Eyring model can be applied to all distributions used in the reliability analysis.

Confidence limits on parameters, life functions and reliability for each of the distributions can be determined with appropriate statistics.

5.6.1.3.1 Model advantages

The model is relatively simple, yet it is applicable for stresses other than thermal. For a known parameter B , rather accurate test acceleration can be achieved.

5.6.1.3.2 Model disadvantages

As with the Arrhenius model, knowledge of the parameter B is critical for correct test acceleration. For products with moderate complexity, accurate test acceleration may become questionable because of different components and materials having a different value for the constant B .

5.6.2 Stress models with stress varying as a function of time – Type B tests

5.6.2.1 General

The time varying stress models are used to account for precipitation of failure modes in order to shorten the test time. These models can be used as a presentation of product usage profile and those are the cumulative damage or cumulative exposure model.

5.6.2.2 Step stress model

The model most frequently used as the step-stress model, where the units under test are subject to a succession of increasing stress levels that are applied for a predetermined time, and at the predetermined stress levels [13], [7].

The stress levels are constant in each of the intervals.

The model can be presented mathematically using the life characteristic for an assumed distribution. As an example, the step stress mathematical representation is as follows.

If reliability of a test unit for a test duration t and the stress S represented as a Weibull distribution is

$$R(t, S) = e^{-\left(\frac{t}{\eta(S)}\right)^\beta} \quad (24)$$

where

$R(t, S)$ is the reliability as a function of time, t , and stress, S ;

β is the shape parameter of the Weibull distribution;

$\eta(S)$ is the scale parameter, a function of stress, S .

Then probability of failure is

$$F(t, S) = 1 - R(t, S) \quad (25)$$

In the above equations, with an example of the inverse power law model, the characteristic life is:

$$\eta(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad (26)$$

For successive stresses (stress levels) S_i , where $i = 1, 2, 3, \dots$

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-\left(C \cdot S_i^m \cdot t\right)^\beta} \quad (27)$$

Data should be analysed using the appropriate distribution (in the case of the above example Weibull), using a cumulative exposure model, which makes a correlation between the failure distributions at the two successive levels. The failure distribution of the test units in each step will be specific to that step; however, the zero time of each particular step coincides with the total accumulated test time prior to that step.

Denoting an equivalent ageing time as τ_i , to account for ageing at the previous stress level:

$$\tau_i = (t_i - t_{i-1}) \cdot \left(\frac{S_i}{S_{i-1}} \right)^m + \tau_{i-1} \quad (28)$$

Probability of failure in the segment, i , then is:

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-\left(C \cdot S_i^m \cdot (t - t_{i-1}) + \tau_{i-1} \right)^\beta} \quad (29)$$

Distribution parameters may be then determined by maximum likelihood or other methods.

Confidence limits can also be set for the probability of failure, reliability, or any other product life measure as described in the related standards on confidence limits, dependent on the established distribution.

5.6.2.2.1 Model advantage

The method is effective to discover potential product weaknesses in the short time period. The associated mathematics is not too complicated, so that the life characteristic of a product as related to the particular stress can be calculated.

5.6.2.2.2 Model disadvantage

The method does not account for ageing of the test units for the time that the previous stress steps are applied. Nor is the time involved enough typically to produce time dependent failure modes such as wear, or creep or high cycle fatigue. The primary driver is stress intensity. Further, this does not take into account potential fatigue or material changes resulting from the repetitive stress. This potential fatigue may precipitate appearance of the failure modes earlier than they would normally appear without the fatigue factor and thus erroneously predict an early time to failure. The effect of the stress is usually logarithmic, so care should be taken not to use a stress level that will cause immediate failure of the UUTs.

The method also does not suggest how to handle appearances of failure modes unrelated to the applied stress, and how to account for them.

Care should be taken to not exceed the short time destruct limit of the UUT.

5.6.3 Stress models that depend on repetition of stress applications – Fatigue models

5.6.3.1 General

Fatigue can be defined as a gradual deterioration of item materials or item structure when those are subjected to repeated loads. Those loads can be mechanical, dynamic, thermal cycling, voltage cycling, etc. With cycling loads (such as thermal cycling, bending, and others) the fatigue is proportional to more than one parameter, usually to the load extremes (the difference between extremes) number of repetitions and to a rate of change.

To represent the relationship between the number of load repetitions and the level of the load, testing is done on a number of items at different stress levels in a series of tests. The endured

stress is plotted against the number of applied stress cycles or applications for which the failures have not occurred. The stress levels are reduced and the number of stress applications is increased. This continues to a point where seemingly, the stress is low enough that the item can endure an “infinite” number of applications. The stress value at this point is often known as the fatigue limit. Not all materials have a fatigue limit; exceptions are, for example, some types of aluminium alloys and plastics.

5.6.3.2 Calculating lifetime according to Miners rule

The Palmgren-Miner linear-cumulative-fatigue-damage-theory (Miner's rule) is used to calculate the resultant pitting or bending fatigue lives for gears that are subjected to loads which are not of constant magnitude but vary over a wide range. According to Miner's rule, failure occurs when:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \quad (30)$$

where

n_i is the number of cycles at the i -th stress level;

N_i is the number of cycles to failure corresponding to the i -th stress level;

n_1/N_1 is the damage ratio (fraction of life) at the i -th stress level.

Replacing number of cycles by the lifetimes:

$$\frac{l_1}{L_1} + \frac{l_2}{L_2} + \dots + \frac{l_i}{L_i} + \dots + \frac{l_m}{L_m} = 1 \quad (31)$$

where

l_i is the time at the i -th stress level;

L_i is the life at the i -th stress level;

l_1/L_1 is the damage ratio at the i -th stress level.

If the time at each of the stress level is expressed as a fraction of time of the total life, L :

$$\begin{aligned} l_1 &= \alpha_1 \times L \\ l_2 &= \alpha_2 \times L \\ l_i &= \alpha_i \times L \end{aligned} \quad (32)$$

where

α_i is the time at the i -th stress level;

L is the life to failure under applied set of loads.

If the same ratio for lives applies as to the number of cycles, then:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1 \times L}{L_1} + \frac{\alpha_2 \times L}{L_2} + \dots + \frac{\alpha_i \times L}{L_i} + \dots + \frac{\alpha_m \times L}{L_m} &= 1 \\ L &= \frac{1}{\frac{\alpha_1}{L_1} + \frac{\alpha_2}{L_2} + \dots + \frac{\alpha_i}{L_i} + \dots + \frac{\alpha_m}{L_m}} \end{aligned} \quad (33)$$

The loads are defined by the time ratio, α_i , and the load ratio, β_i and additionally a speed ratio ω_i is needed for the calculation of the permissible lifetimes L_i

where

β_i is the ratio between the instantaneous load and the base (overall) load;

ω_i is the instantaneous speed/nominal load.

The stress vs. number of cycles diagram is plotted from the fatigue tests and is known as the S-N curve. From a series of S-N curves, and with the assumption of the inverse power law of stress levels the parameter m , described in 5.6.1.1 is determined.

5.6.4 Other acceleration models – Time and event compression

5.6.4.1 General

Other acceleration models can be found in IEC 61163-2 and in [17].

5.6.4.2 Step-by-step procedure for event compression and time compression tests (Type C tests)

- Step 1: determine which factors can be event compressed and how much without changing failure modes;
- Step 2: determine which periods in the mission profile can be time compressed and how much (IEC 60605-2);
- Step 3: estimate the acceleration factor(s) for the potential failure modes (see 5.2.2.1);
- Step 4: determine the sample size (see IEC 61649);
- Step 5: perform test (see IEC 60300-3-5);
- Step 6: perform failure analysis;
- Step 7: analyse test results for each failure mode separately (see IEC 61649);
- Step 8: report results (see IEC 60300-3-5).

5.7 Acceleration of quantitative reliability tests

5.7.1 Reliability requirements, goals, and use profile

5.7.1.1 General

This material is discussed at length and in detail in other dependability standards and literature, but, for completeness some brief explanations are included in this standard.

5.7.1.2 Product and component use profile

Often the manufacturers choose to test a product in an accelerated test that simulates environmental stresses as they are experienced in the field. Some of the reasons for such tests may be to verify that the previous tests (e.g. HALT) did not miss a failure mode that could appear in life or to estimate field reliability of that product. There are instances where, due to space or performance constraints, one or more components in that product may be insufficiently derated which may not provide adequate stress vs. strength margin. In these instances, product reliability may be highly dependent on the manner of its use, operational and environmental stresses, their combination and sequence.

A product use profile consists of the following:

- operational and environmental stresses, their magnitude and sequence;
- the duration and number of sequence segments.

These use profiles can be chosen from one of the following evaluation conditions: average use profile, aggressive use profile, and a spectrum of use profile conditions.

These operational stresses and sequences should be known down to the assembly, critical components, and those components that may need to be subjected to accelerated reliability testing.

5.7.1.3 Reliability goals or requirements

The overall reliability goal should be expressed in terms that are acceptable and understandable to the organization or to the customer. This goal may be expressed as a percent failed products at the end of specific time period (i.e. warranty) and/or multiple periods. The goal may also be expressed as a warranty and/or maintenance cost. At times it is found appropriate to express the goal reliability in terms of a mean time to failure (MTTF) or mean operating time between failures (MTBF).

Regardless of how the goal is specified, it must be understood that the goal reliability is related to the manner the item is going to be used, and that the same “number” or “reliability measure” is different for different use profiles (operational stresses of location). Conversely, the MTTF or MTBF of that item is only an average value representing the specific stress combinations. For that reason, any claimed reliability values of an item should be accompanied with the explanation of the expected use and relative degree of severity.

In cases where two or more stresses are applied to a product consisting of several components, the test acceleration is done by increasing each individual stress using models appropriate for those stresses. In these cases, failure rates representing each of the failure mechanisms are individually accelerated and the overall component reliability (R) or failure probability (F) has to be estimated separately. This can be expressed in general form for a combination of n independent stresses as:

$$R_{equipment} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (34)$$

For the failure probability:

$$F_{equipment} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \quad (35)$$

The problem of competing risks is described in Annex G of IEC 61649:2008.

If an item consists of m components or piece parts which at any given time are subject to a set of n stresses that influences all the failure modes simultaneously, then its reliability in a segment of time (part of a use profile where a specific stress combination exists) t_k is:

$$R_{Item}(Stress, t_k) = \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(Stress_i, t_k) \right]_j \quad (36)$$

If there are w segments in total use profile with different stress combinations, then total reliability of that item for a life or other predetermined time, t_0 is:

$$R_{Item}(Stress, t_0) = \prod_{k=1}^w \left\{ \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(Stress_i, t_k) \right]_j \right\} \quad (37)$$

where

$$t_0 = \sum_{k=1}^w t_k \quad (38)$$

These equations are conservative, i.e. they may seriously underestimate the reliability of the equipment.

The total average failure rate of such item is also a function of applied stresses and uses profile, and can be written as:

$$\lambda_{a_Item}(Stress, t_0) = -\frac{\ln[R_{Item}(Stress, t_0)]}{t_0} \quad (39)$$

For any other stress conditions or use profile, the average failure rate of the item will be different.

Reliability requirements for repairable items shall be viewed in terms of expected preventive maintenance, that is, parts of the item should be viewed separately for reliability and the time duration for which the requirements are prepared, should correspond to the expected maintenance time.

5.7.2 Reliability demonstration or life tests

5.7.2.1 Applicable test types

Practically, most tests can be accelerated to shorten the test time. Certain reliability tests that can be accelerated are reliability demonstration, improvement, or assurance tests which can be:

- success tests, fixed duration;
- tests with failures, fixed duration;
- test to failure (usually for components or small assemblies and individual failure modes);
- reliability improvement/growth tests, which are usually prepared for a predetermined time period;
- sequential probability ratio tests (SPRT).

Engineering evaluation tests which are usually performed in view of a suspect failure mode can also be accelerated provided there is some knowledge of acceleration factors for those test items and the expected or suspect failure modes.

5.7.2.2 Reliability testing of a product or an item – Cumulative damage model

When a reliability test program is prepared in view of the reliability for the specific use profile then the results of the test program are valid for that specified use profile only. If reliability estimates for other use profiles are needed for the same product, this can be achieved by additional testing or adjusting the test results by mathematically modelling the test results to the new use profile. This modelling can be done in cases where there is a known relationship between the stresses and use profile applied in the test and to the new adjusted use profile (see IEC 61709).

In case there are multiple differences between the two use profiles, there is more chance of model inaccuracy in adjusting the reliability estimate for the new profile. These differences rapidly increase with complexity of the system under evaluation.

Product and component reliability in regards to operational and environmental stresses as a function of predetermined time (lifetime) t_0 , can be expressed as follows:

$$R(t_0) = R_U(t_0) \times \prod_i R_{S_i}(t_0) \times \prod_i R_{E_i}(t_0) \quad (40)$$

In the above equation $R_E(t_0)$ denotes reliability of the item regarding environmental stresses for the time duration t_0 , while $R_S(t_0)$ denotes reliability regarding operational stresses. Factor $R_U(t_0)$ is used to represent unknown interaction or synergism of individual environmental and/or operational stresses as determination of individual stress duration and magnitude assumes stress independency, which in most cases may not be a valid assumption.

Equation (40) can be generalized to be written in the form:

$$R_{Item}(t_0) = \prod_{i=1}^{N_S} R_{Stress_i}(t_i) \quad (41)$$

If $R_{Item}(t_0)$ is the product reliability goal or the product reliability requirement that needs to be demonstrated in test, then a reliability value may be allocated to each of the multiples in the expression for the product reliability. Simplified for illustration the allocated individual reliabilities may be assumed to be the same.

$$\begin{aligned} R_{Item}(t_0) &= \left(R_{Stress_i}(t_i) \right)^{N_S} \\ R_{Stress_i}(t_i) &= \sqrt[N_S]{R_{Item}(t_0)} \end{aligned} \quad (42)$$

The allocated values to reliability regarding individual stresses differ depending on the product intended use and usage profile and its sensitivity to a particular environment. Besides the magnitude of stresses expected in the actual use, it is their cumulative effect that affects product reliability. The test duration is then calculated based on the duration of each of the stresses applied in actual use, while the test acceleration is achieved by increasing the magnitude of each of the individual stresses or by their time acceleration.

When the purpose of the test is to estimate reliability in the field, an average user stress profile should be used. This profile can be estimated for given climatic conditions as for example Central Europe (see the IEC 60721 series). Different locations may have different prevalent or extreme stresses. As an example, in some countries such as Northern Scandinavia, Canada and Russia, low temperature may be one of the highest stresses, while New Mexico, Africa and India it may be high temperatures. In Singapore and Japan the most pronounced stress may be humidity and in New Delhi it may be air pollution. Regarding the manner of use, the test can simulate an average user or an extreme user (e.g. where less than 1 % of the customers heavily load the product). It is not advisable to transfer a test result from one environmental and user profile to another. Therefore many companies supplement the environmental test with survival tests where the purpose of the test is to determine if the product will survive a few extreme loads that are not expected to be repeated so often that they would influence the long term reliability of the product. Such environmental tests are described in the IEC 60068 series.

Often, products are tested with a stress cycle in order to expose the product to several stresses in combination or sequentially. Ideally, the stresses should be applied combined and intermittent in order to simulate the field conditions as well as possible. But in practice this is seldom possible. In order to use the test equipment in an optimum way and make it easier to locate the stress type and level that caused the failure the test is often made using a test cycle, e.g. of 1 week duration.

In the following it is assumed that the item is tested for each of the expected stresses, operational and environmental, having in mind their levels and cumulative duration in actual use and the corresponding total use period, t_0 .

If the stress in the cumulative damage is proportional to duration of a stress, then reliability regarding each individual stress can be expressed as:

$$R_i(k, \mu_{L_i}) = \Phi \left[\frac{k \times \mu_{L_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(a \times k \times \mu_{L_i})^2 + (b \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad (43)$$

where

- R_i is the reliability allocated to the item regarding the specific stress during the duration of its application;
- k is the multiplier of the actual stress duration, assuming the cumulative damage models;
- μ_{L_i} is the mean duration of that load (stress) application in use;
- a and b are the multipliers of strength and load mean values that would produce their respective standard deviations;
- Φ is the symbol for the cumulative normal distribution.

By the cancelling out the mean loads, Equation (43) is reduced to the following format:

$$R_i(k, \mu_{L_i}) = \Phi \left[\frac{k - 1}{\sqrt{(a \times k)^2 + b^2}} \right] \quad (44)$$

Plotted as a function of k for given values of a and b , reliability as a function of k is shown in Figure 7.

In Equation (43) it is assumed that each of the stresses can be modelled by a normal distribution. Preferably information on the exact distribution (factors a and b) should be used. If there is no information of the exact distributions, the standard deviations may be assumed to be as large as 10 % of the mean value. The reduced Equation (43) becomes:

$$R_i(k) = \Phi \left[\frac{(k - 1) \times 10}{\sqrt{k^2 + 1}} \right] \quad (45)$$

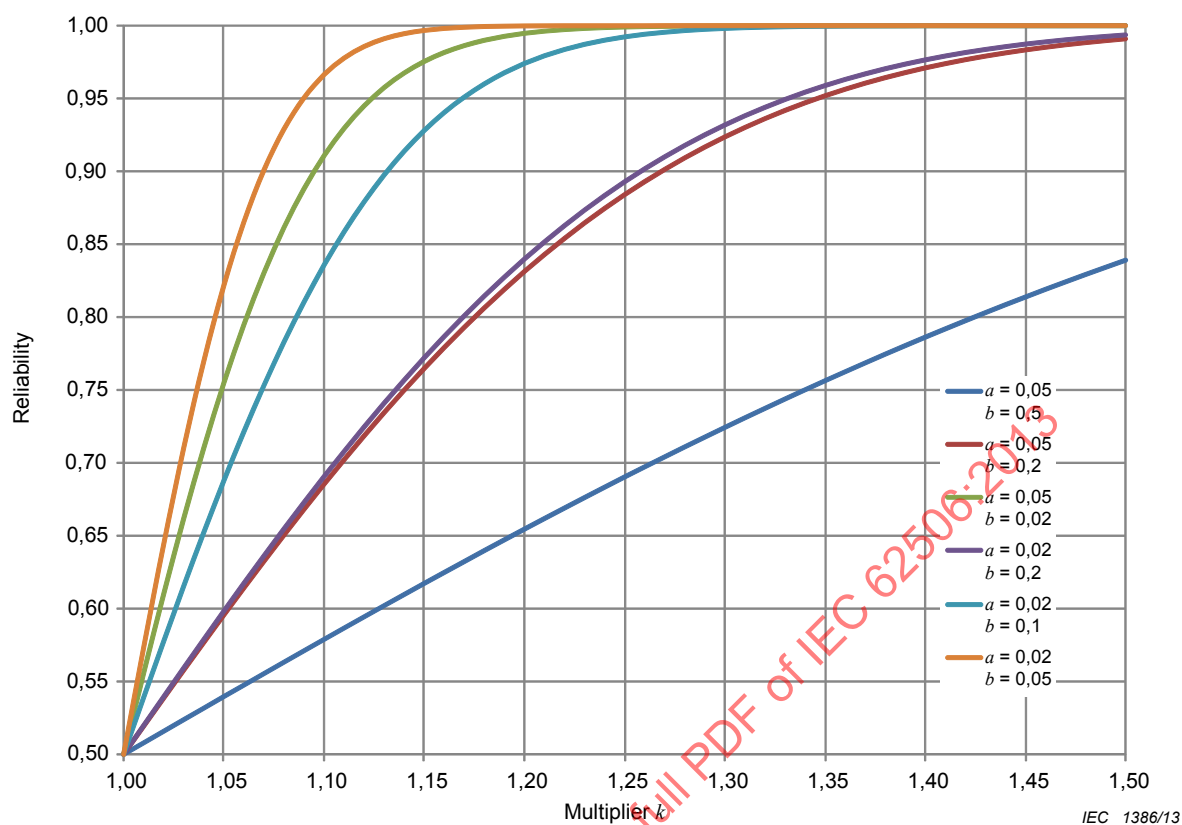
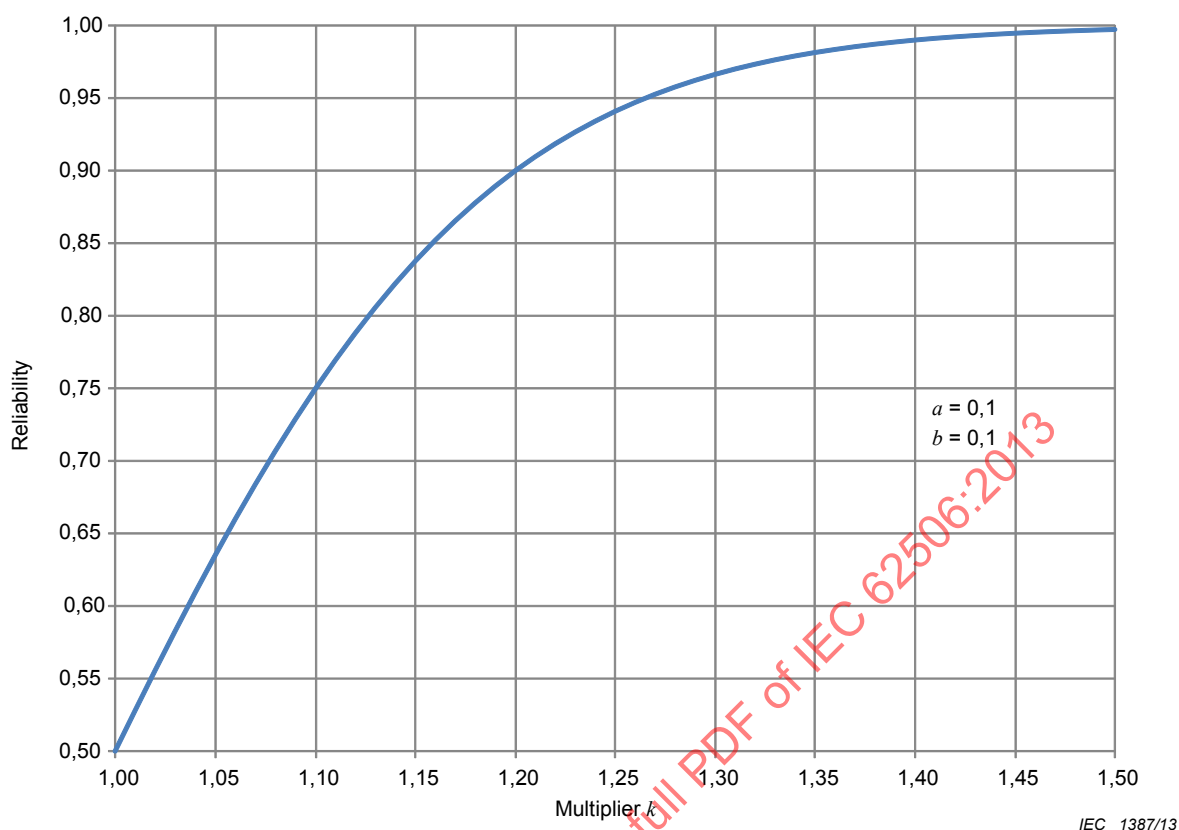


Figure 7 – Multiplier of the test stress duration for demonstration of required reliability for compliance or reliability growth testing

A specific plot for the chosen values of $a = 0.1$, and $b = 0.1$ is shown in Figure 8.



NOTE k is sometimes called the “lifetime ratio”.

Figure 8 – Multiplier of the duration of the load application for the desired reliability

The duration of each stress application as determined above would result in a stress application longer (approximately 1,4 or 1,5 times) than the duration of the stress application in use. To make testing possible, the stress levels are then accelerated by applying the appropriate acceleration factors. The stress acceleration type and the product specific acceleration factors for the various expected stresses need to be known. These need to be obtained through tests-to-failure at different stress levels for the specific components (see Annexes F and G).

The above program can be prepared in different forms:

- as a success test, test with no failures;
- as a test with an allowed number of failures;
- as a fixed duration test, but without reliability requirement, thus the reliability of the product will be estimated based on the number of failures in the test;
- as a reliability growth/improvement test based on an assumed growth rate.

When it is a success test, the results are simply and easy to interpret. Without failures, the test demonstrates the reliability requirement with applied confidence intervals.

If this test is to allow a certain number of failures, then determination of its duration should account for the allowed number of failures. The test then becomes the “fixed number of failures” test.

If the test is reliability growth test, then the total test duration (or sample size in view of accumulated test time) is prepared for the expected total numbers of test failures, r , having in

mind the total duration of the applied stresses, required confidence and the required demonstrated reliability (see IEC 62429).

5.7.3 Testing of components for a reliability measure

Mass produced electronic components are subject to accelerated stress testing to determine their reliability measure (failure rate or other) under the use stress. To determine the appropriate acceleration factors, test structures for new component technologies are tested at several stress levels to failure, and the appropriate failure modes and empirical factors for the acceleration models are determined. The qualification method is described in JESD47 [26]. Selection of stresses and their levels is made dependent on the expected failure modes of the components.

Larger components manufactured in smaller volumes can often be reliability tested using accelerated test methods and statistical tools like IEC 61649 or IEC 61124. Based on the ratio of parameters of the specific distribution (i.e., characteristic lives in Weibull distribution), acceleration factors are established for the particular stresses which are then used to predict their reliability at other stress levels of the same stress types. If more than one distribution parameters are different for the different levels of the same stress, then it may be expected that the physical characteristics may change too. As an example, if the characteristic life as well as the shape parameter in Weibull distribution is different at different stress levels, it may be an indicator that perhaps the stress level was too high and has changed physical characteristic of that component or that the manufacturing process was flawed. If that happened within the component rating it could mean that the component rating needs to be re-evaluated.

Usual environments for component testing are as follows:

- temperature;
- vibration;
- humidity;
- thermal cycling;
- salt exposure.

Some examples of operational stresses include

- voltage,
- current,
- force,
- friction.

An example of accelerated testing for a component is shown in Annex B.

The accelerated test time is relevant for estimated life of the components. It is testing to failures that provides meaningful results while testing with no failures may provide information only if the test approximates a component life with a margin. The traditional total accumulated test time of multiple components (the total test time is a sum of all the times accumulated on single components) may lead to meaningless results in predicting the reliability beyond the actual test duration for a single component. As an example, 32 000 km on 100 tyres with zero failures could lead to an erroneous conclusion that 36,8 % of the tyres would last 3 490 000 km. The calculated failure rate is only valid to 32 000 km of the test. It is possible, however, to estimate failure rates beyond the duration of test through Weibayes analysis, assuming a known Weibull slope (see IEC 61649).

While obvious for the tyre example, this fact is not too obvious for other components. Electronic components are normally tested by the manufacturers for 1 000 h, and usually on 77 components. If that test is accelerated, it may provide information only for the normalized to in use level (life equivalent) time. The fact that the multiple components were tested does

not improve the test results, only the degree of confidence (see JESD47 and JESD85 [26],[28]).

5.7.4 Reliability measures for components and systems/items

5.7.4.1 Electronic components

With electronic components, the preferred reliability measure is the instantaneous failure rate determined for standard profile conditions (see IEC 61709).

This allows the instantaneous failure rate to be re-calculated for the actual stresses of the operational use profile of the product. The re-calculations are done using appropriate acceleration models (see IEC 61709).

This information is provided at a given temperature and environment as well as other specified stresses.

The stated failure rate is often the average failure rate over the useful life of the component, assuming exponential time to failure. However, some electronic and electro-mechanical components have a limited life (wear out). For these components, there is a need to estimate the end of their useful life. Components with limited life include, for example: power transistors, opto-couplers, LEDs and laser diodes, wet electrolytic capacitors, varistors, light bulbs, relays, switches, connectors and batteries (see IEC/TR 62380).

5.7.4.2 Mechanical components

With mechanical components, the preferred reliability measure is the percent failures determined for standard profile conditions. Often this is stated as the operating time for a given percentage of failures as for example 10 % (often denoted as B10 or L10 life) or 1 % failures (often denoted as B1 or L1 life). For the estimation method, see IEC 61649.

This allows the reliability to be re-calculated for the actual stresses of the operational use profile of the product. The re-calculations are done using appropriate acceleration models.

If expressed in terms of failure rate, the failure rate is often calculated as the equivalent failure rate calculated from the estimated probability of survival and is valid for the specified stresses; however, this gives no information about the expected life time of the component.

5.7.4.3 Assemblies, systems (items)

The more complex items made of components (electrical and mechanical, including software) would be best represented by expressing probability of survival or probability of failure. These measures allow combinations of different failure distributions and are more appropriate when including software.

5.8 Accelerated reliability compliance or evaluation tests

Reliability compliance tests, sequential probability ratio test (SPRT) and fixed duration tests are designed with the assumption of a constant failure rate, as the complexity of items and their failure modes would not accommodate any other distribution unless the tests were used for determination of item reliability with regard to individual failure modes, which is the case for components (piece parts).

Given the high reliability (or MTTF/MTBF) of the products, these tests traditionally have cost or schedule prohibitive duration and need to be accelerated. As the test designs are the same for repaired or replaced items as for those that are not repaired, in this subclause the term MTBF is used for both MTTF and itself.

There are many descriptions, mathematical derivations, plot fitting and explanations of this test type in the literature, however the actual tests, what they consist of and what stresses are to be applied, as well as the rationale behind them, are not readily available. Understanding that a test is only as good as the stresses it represents, the rationale of item reliability that needs to be demonstrated is the same as for the fixed duration tests shown in Equation (37), and the duration of applied stresses (not accelerated) when testing needs to be in accordance with Equation (38).

The average failure rate that shall be demonstrated through the test is determined from the appropriate reliability equation. In its simplest form, the failure rate, assuming exponential distributed time to failure, is as follows:

$$\lambda_0 = -\frac{\ln[R(t_0)]}{t_0} \quad (46)$$

where

t_0 is the expected operating time.

The failure rate is then accelerated using proper acceleration factors for each of the applied environments and becomes

$$\lambda_A = A_{\text{Test}} \times \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \left(\prod_k A_k \right) \times \lambda_i \right) \quad (47)$$

where

λ_0 is the failure rate that the item has in its “in use” conditions;

λ_A is the accelerated, test, failure rate;

A_i is the acceleration factor for each of the increased stresses in test;

λ_i is the failure rate of the item corresponding to the specific stress;

N_S is the number of stresses.

Total equivalent test acceleration factor is then (Krasich acceleration model for constant failure rate [10]):

$$A_{\text{Test}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \left(\prod_k A_k \right) \cdot \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad (48)$$

$$A_{\text{Test}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \cdot \left(\prod_k A_k \right) \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (49)$$

Reciprocal of the accelerated failure rate from Equation (46) will yield the MTBF, m_0 , which can be determined from tests.

$$m_0 = \frac{1}{\lambda_a} = -\frac{t_0}{\ln(R_0(t_0))} \quad (50)$$

Other parameters of the SPRT and fixed duration tests are then applied in accordance with normal SPRT test design (discrimination ratio, producer's and customer's risk, etc).

The main difference between the accelerated reliability compliance and the conventional test is the minimum test time. This minimum test time shall not be shorter than the required minimum test time, determined for the accelerated test which, in turn, is a function of required reliability, the applied stresses and the test acceleration. The sample size, therefore, shall be limited so that the minimum test time, corresponding to zero failures on the acceptance line, is equal to or longer than the minimum required accelerated test duration for demonstration of required reliability.

The SPRT is designed in the same way as the non-accelerated test; the accept and reject criteria are established, the test plan is prepared in accordance with the accepted producer and consumer risk, discrimination ratio, except the lower test MTTF is the reciprocal of the accelerated failure rate. The other exception is that the environments are accelerated and applied in the same way as they are applied in the fixed duration tests.

An example of the accelerated SPRT is shown in Annex B.

5.9 Accelerated reliability growth testing

When reliability growth testing is accelerated, each of the stresses that are expected to be present in the product life is accelerated in accordance with the acceleration criteria. The stresses can be applied individually, in which case it is preferred that they are distributed e.g. in a test cycle, so that the cumulative effect is simulated. The preferred manner is to apply as many stresses as possible simultaneously so as to include their possible interaction.

The duration of each applied stress is such that it represents its life application with the margin necessary for reliability demonstration (as shown in fixed duration tests). Time to failure is then the test time multiplied by the appropriate acceleration factor. When the stresses are applied simultaneously, then it is important to determine the cause of failure so that the proper time to failure can be established. Recalculated for the use time, the failure times are then organized in increasing order and one of analysis methods used for reliability growth test type is applied (see IEC 61164).

When analysis is carried out in this manner, the order of stress application does not skew the test results, as the failure are re-calculated per their "real time" of occurrence.

Annex B provides examples of reliability growth test acceleration and data analysis. Acceleration testing guidelines

5.10 Guidelines for accelerated testing

5.10.1 Accelerated testing for multiple stresses and the known use profile

When the accelerated testing is prepared for the various combinations of multiple stresses, it is important to simulate the conditions of use to the best degree possible.

The stresses, both environmental and operational, are usually not applied as they occur in life, which is in different combinations in each of the specific sequences. The test stresses are combined where possible for the test, but are also performed as a single stress. The thermal cycling and thermal exposure can be easily combined into one test, with the addition of operational cycling, voltage changes, applied sound power, etc. Vibration tests can be done also combined with thermal cycling, but the short duration of vibration compared with the thermal cycling and exposure makes it technically difficult. Some tests, such as pothole shocks, acoustic noise, dust accumulation, hazardous or explosive chemicals and lubricants, are very difficult to combine with others. In such cases, the environmental exposures are distributed so that they can cause cumulative damage in sequence. This is done usually by

splitting up the duration of certain tests into two or even three segments, or even changing the sequence between the exposures.

5.10.2 Level of accelerated stresses

A reasonable general rule is that accelerated stress levels should not exceed the levels at which the physical or chemical properties of the test item might change.

For some tests where the intention is to understand the stress limits of the product, this guideline does not apply. With these tests, however, it is not recommended to relate the results to any reliability demonstration value, due to the inaccuracies of any acceleration model beyond the inherent assumptions. Examples of such tests are step stress or failure mode sensitivity investigations.

5.10.3 Accelerated reliability and verification tests

Item performance tests are often confused with certain accelerated reliability demonstrations. It is not unusual for a customer to present the procedures along with reliability requirements. Some even claim that if the prescribed tests are performed, reliability requirements would be met.

Verification tests are designed to verify ability of an item to perform in accordance with the specified environmental extremes, with adequate durability and reliability. If a specific reliability demonstration test is required dictating a particular set and length of tests with a required sample size it usually does not represent a true reliability test and no demonstrated reliability can be claimed if that test was a success (without a failure). Even though those tests might represent some duration in life, there can be no correlation made between performance verification and product reliability.

Completion of validation tests proves that the item conforms to the design specifications so that it can perform when subject to the listed extreme stresses. The sample size typically is inadequate for any reliability demonstration or robustness to manufacturing variation, and the fact that the small item samples are subject to limited test sequences does not allow any statements about their reliability for all stresses expected to be experienced in their use.

6 Accelerated testing strategy in product development

6.1 Accelerated testing sampling plan

For a qualitative accelerated test (Type A test) the sample size is determined by the number of stresses and the number of identified failure modes. An item may have to be removed from the test either because the destruct limit has been found or because the item is needed for failure (mode) analysis. In some cases the item may be repaired and the test continued. Therefore a number of spare modules and spare parts should be available during the HALT test. But it is recommended not to count on a repair being possible. Therefore the test should be planned for at least one sample per stress type. For a classical HALT this means one for cold temperature, one for high temperature, one for vibration, one for temperature cycling and one for combined temperature cycling and vibration. In total this is 5. To account for more than one failure mode another 2 to 5 samples are recommended, so the total recommended sample size is 7 – 10 items. If that number of items are not available repairs must be made during the test.

For a quantitative accelerated test (Type B and C test) the number of items are mainly determined by whether the purpose of the test is to estimate the average constant risk (exponential failure distribution assumed) or the purpose is to estimate the time to failure (life time) for the items.

For the exponential case the advantage is that the accumulated test time can be increased by increasing the sample size as the accumulated test time is calculated as sample size

multiplied with test time. In this case it is assumed that testing one item for 1 000 h gives the same result as testing 1 000 items for one hour each. Obviously this is not the case. Therefore both the sample size and the test time have to be chosen so as to have a realistic picture of the failure mode (time to the different failure modes) as well as the differences of strength from item to item (number of samples in the test). A typical sample size for an accelerated component test is 77 samples for 1 000 h (see JESD 47B [26]). For the exponential case test plan standards like IEC 61123 and IEC 61124 can be used. If a weak distribution is suspected the sample size should be so large that at least one weak item is with high probability expected in the test. The accumulated test time can be multiplied with the estimated acceleration factor in order to estimate the equivalent number of operating h in the field. The average failure rate can be estimated using IEC 60605-6.

For the case where the purpose of the test is to estimate the time to failure (life time), the test time have to be long enough to give enough time to estimate the time to failure for the different failure modes. Each failure mode has to be calculated separately (see IEC 61649 and IEC 61710). For a test analysed using the Weibull distribution at least 5 – 10 failures should be expected. Since a Weibull test is often stopped once one third of the tested items have failed the sample size should be 15 – 30 items. If more than one failure mode is expected these numbers should be multiplied with the expected failure modes. If a weak distribution is suspected the sample size should be so large that at least one weak item is with high probability expected in the test. For example if a weak population of 5 % is suspected the sample size should be at least 30 items. In order to reduce the test time and the number of items that fail (e.g. are destroyed) during the test sudden death test can be used (see IEC 61649).

6.2 General discussion about test stresses and durations

Often the test methods of the IEC 60068 series are used. These standards give different test severities but no guidance on which severity to use. Some guidance can however be found in the IEC 60721 series.

When comparing test conditions with field conditions it will seldom be possible to simulate the field conditions since they vary with user, climatic conditions etc. Therefore a representative or worst case conditions have to be chosen. Some tests operate with the term “severe user” which is a user defined so that only a small percentage e.g. 1 % of the user operates the product under higher stress conditions.

When testing for life time e.g. using test of type C the test is usually extended to more loading cycles or longer time than the product is expected to encounter in the field in order to take into account the variations in the Stress and Strength distribution and ensure a proper confidence in the estimated reliability. This is called multipliers of the stress duration or lifetime ratio (see 5.7.2.2 and Annex B).

Since the conditions of usage vary from user to user, geographically and over time the test conditions have to be simplified. For practical reasons the stress types are often applied in sequence instead of simultaneously. If the stress types are tested on different samples the test will not detect the effect of interactions between the stress types. Therefore it is recommended to combine stresses when possible. However this usually requires more complicated and expensive test equipment. When stress types are applied sequentially it is important to combine the stresses to test cycles where the different stress types are applied in sequence for example during one day or one week. This test cycle is then repeated the required number of times. It will often also be a consideration that the test is reproducible. This is important for test laboratories that test equipment for approval. An example is a drop test of a product. If the test is performed so that the product always hit in the same angle, the test will be very reproducible, but will not simulate the conditions in the field, where the angle at which the product hit will be random.

6.3 Testing components for multiple stresses

Normally components are tested for each stress type separately (see JESD47B) [26]. However in some cases combined test is used in order to test for the combined effect of stresses. One example is pre conditioning of components by exposing them to 3 times a thermal cycle equal to the soldering profile. Even though the component is not soldered in this preconditioning the temperature cycling affects the interior of the components in a way similar to the soldering process. Another example of a combined test is thermal cycling after a Moisture Sensitivity Level test to see if delamination in the components propagates (see JEDEC JESD-A113 [23] and JEDEC STD A104-B [28]). Often the component testing will target a specific failure mode in order to verify that the failure mode is not present in the component, or the time to failure is acceptable. Component tests are often made on test structures instead of on functioning components in order to save test effort and qualify the technology used for a family of components. For components accelerated tests of type B and C are recommended, unless the component test is done as a part of root cause investigation in which case type A tests could be recommended.

6.4 Accelerated testing of assemblies

Assemblies are often tested for each stress type separately. But since there are more interactions possible in an assembly than in a component, combined stresses are more important for assemblies. Often assemblies have a size and a function suitable for a HALT test since HALT test often do not work well with small items (components) or large items (systems). For assemblies accelerated tests of Type A, B and C should be considered. Often the maximum applicable stress in a Type B or C test is determined by the weakest component in the assembly.

6.5 Accelerated testing of systems

Systems are often tested with combined stresses using tests of Type B and C. Often these stresses are combined in a test cycle. If the components and assemblies have been tested previously the test on system level will mainly test the integration of the components and the assemblies. Usually the system will also include embedded software and this have to be taken into account in the test (see IEC 62429). In many cases the exponential time to failure assumption is made since the sample size is small and ideally there should be no failures or only a few failures in the test. Often tests on system level are used for reliability growth testing (see IEC 61014, IEC 61164 and IEC 62303).

6.6 Analysis of test results

For qualitative accelerated testing (Type A tests) the result is the failure mode and the stress conditions at which they were observed. A thorough failure analysis is required to find the root cause of the failure and estimate by an engineering evaluation if the failure mode could occur at lower stress levels in the field due to the variations of the strength and stress distributions (see 5.1.1.2). The purpose of the HALT test is to identify the few weaknesses in the product that need to be improved for the whole product to be sufficiently robust. The tests of type A do not give an estimate of life time or failure rate for the product.

For quantitative accelerated tests (Type B and C) the acceleration factor has to be estimated to link the test time with the equivalent time in the field. Each failure mode has to be analysed separately. Therefore a failure analysis is required for all failures. Once an estimate has been made for each failure mode observed, the failure probability and time to failure can be added to estimate the failure probability of the product as a function of time (see 5.2.2.1). Statistical tools that can be used for analysis include IEC 61123, IEC 61124, IEC 60605-6, IEC 61649, IEC 62303 and IEC 62429.

7 Limitations of accelerated testing methodology

There are several major limitations of accelerated reliability testing methodologies shown in the following list (which is not exhaustive):

- Determination of acceleration factors is very complex and cost and time prohibitive. Thus, accelerated testing duration and reliability results (values), which are dependent on acceleration factors, have limited precision.
- It may be very difficult at times to speculate which stresses contribute in combination to a specific failure mode and to what degree. Therefore the acceleration factor for combined influences also may be over or underestimated.
- Items to be tested may be too large, or too expensive. In either case, the sample size may be limited for a reasonable confidence level in test.
- Test equipment which includes automated test monitoring may be too complex to be affordable or manageable.
- Some means of test acceleration may not be attainable because of large thermal masses of the tested items or because of limited stress rating. Thus testing can also become time and cost prohibitive due to lack of efficient acceleration.
- In HALT, the number of test samples is frequently not larger than one, and may not be representative of the average strength of all of the items; so that its destruct design limits may also be different, pointing to wrong conclusions. An opposite case is also possible, where the test unit may be of higher strength than that of the average samples.
- In components testing, usually the curves are constructed based on times to failures, and those are used for determination of test acceleration and for information on components reliability. When the components are small and have failed catastrophically (burned or greatly changed physical properties), it often is not possible to determine in which failure mode they did fail, therefore, the results may be fitted with the wrong distributions, resulting in the wrong reliability information.
- Accelerated testing of items yields information on only stresses and their combination that are considered for test preparation. The test results cannot be used if the product is used in different manner or in different environments. The re-test would be required.
- The results of quantifying reliability through acceleration may not always be predictive on an individual product since it may operate at different stress levels than was tested.

Annex A **(informative)**

Highly accelerated limit test (HALT)

A.1 HALT procedure

A typical procedure for HALT is as follows:

- Step 1: Determine stress level where the test will be stopped if UUT has not failed.
- Step 2: Set-up: mount the UUT in the HALT chamber and make the necessary connections for power supply, signals in and out, connections to monitor the function of the UUT etc. The stress level on the UUT should be monitored by sensors (e.g. temperature sensors, accelerometers etc.). Care should be taken that the connections can survive the stresses applied in test. In some cases part of the UUT that need not be exposed to high stresses, are placed outside the chamber, so HALT is not applied to them.
- The item should be mounted to the HALT vibration fixture so that the desired vibrations or shock profiles are applied to the UUT without being considerably dampened. The fastening or fixture should not protect the UUT from rapid air movements in the chamber. In some cases it may be necessary to remove enclosures to allow free access of the chamber air to the interior of the UUT. It may also be necessary to remove plastic enclosures or parts/components that cannot survive the high temperature or vibration acceleration during the test.
- Step 3: Initial testing: the UUT must be functionally operational prior to HALT. The monitoring devices also need to be tested for their proper functionality. Connections to the UUT also need to be checked for their integrity and capability to withstand the stresses in the HALT chamber, e.g., high air flow.
- Step 4: Increase the applied stress to the desired level. If the UUT is continuously monitored, the stress level can be increased continuously. If continuous monitoring is not possible, the stress levels have to be increased in steps, allowing the UUT to stabilize at each level before it is functionally tested to gather the possible failure information (if a failure did occur). The stress level is then reduced to see if the function of the UUT is resumed, possibly after a reset. If the functionality resumes, then the stress level where the UUT stopped functioning is the Operating Limit (OL).
- Step 5: The stress level is increased until the UUT can no longer resume functioning even when the stress level is decreased. This stress level is the Destruct Limit (DL). In some cases the function can be resumed when the stress is removed even though there is a permanent damage (e.g. a crack). Therefore a so called detection screen is used where the UUT is subjected to a weak vibration level during the functional testing to activate intermittent failures. The UUT is then inspected and if necessary removed from the test chamber so that enough information can be collected to determine the failure mode, and if possible the root cause of the failure. In some cases the UUT will be permanently removed for failure analysis. In that case a new UUT should be mounted and the test continued. Where possible the fault in the UUT should be repaired, and the weak part of the design should be strengthened (e.g. by support or filling material) or protected (e.g. by directing cool air to the position or isolating the item against cold air as relevant). In some cases the part of the weaker design can be protected from the high stress or even moved out of the test chamber with connections to the rest of the UUT inside. In this way the test should be allowed to continue to find the next weakest part of the design.
- Step 6: Continue until the limit determined in Step 1 has been reached.
- Step 7: Repeat the procedure from Step 2 to Step 6 with another type of stress (e.g. hot air).

NOTE The traditional HALT uses the following sequence of stresses: low temperature, high temperature and cycling between high and low operating temperature.

- Step 8: Repeat Step 2 to Step 6 with cycling between UOL and LOL.
- Step 9: For the traditional HALT now repeat step 2 to step 5 with vibration/shock pulses.
- Step 10: For the traditional HALT combine thermal cycling (Step 8) and vibration (Step 9).
- Step 11: Repeat Step 2 to Step 5 for the combined stresses.
- Step 12: Perform failure analysis to determine which failure modes may occur at lower stress in the field use. Estimate the margin of the design taking into account the worst field conditions and the variations in the manufacturing processes.
- Step 13: Report result. When the design improvements are implemented the UUT is to be retested if possible to verify improvement (IEC 60300-3-5).

Depending on the type of product and its sensitivity, the order of test stresses can be changed.

A.2 Example 1 – HALT test results for a DC/DC converter

The DC/DC converter is designed for installation in an aeroplane

Table A.1 – Summary of HALT test results for a DC/DC converter

Exposure	Result	Remarks	Possible cause	Action
Low temperature	LOT –70 °C (start-up) LOT –76 °C (operation) LDT Not found	Weakness: start-up unstable	Unstable start-up of 5 V and 3,3 V at low temperature. Characteristics changed – Ripples	None Limit of technology
High temperature	UOT +125 °C UDT Not found	Weakness: 12 V disappeared	Internal temperature limit causes shut down	Limit set in software
Vibration	OVL 294,3 m/s ² r.m.s. 588,6 m/s ² r.m.s. VDL 588,6 m/s ² r.m.s.	Loose screw. Unstable voltage	Screw too loose. Hand-solder failed	Apply Loctite ² . Solder processes
Temperature cycling –70 °C to +125 °C 4 m in to 10 min dwell time	No weaknesses found after more than 20 cycles			
Combined vibration and temperature cycling 40, 50 and 60 g r.m.s. –70 °C to +125 °C		3 components fell off PWB Problems with 5 V DC		Review of production processes Further investigation required

A.3 Example 2 – HALT test results for a medical product

The medical product is designed for diagnostic use at a hospital.

² Loctite is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this standard and does not constitute an endorsement by IEC of this/these product(s).

Table A.2 – Summary of HALT results from a medical system

Exposure	Result	Remarks	Possible cause	Action
Low temperature	LOT –35 °C (module) LOT –0 °C (PC) LDT Not found	–20 °C. Output unstable. –35 °C. System stops		Error not found but similar problems seen in production at +10 °C
High temperature	UOT +59 °C +60 °C +70 °C UDT Not found +60 °C +70 °C UDT Not found	Stops after switching task. Fan does not start. 3,3 V shorted. Keyboard error		Oscillator failure To be analysed Component failure To be analysed Component failure
Vibration	OVL 49,05 m/sec ² r.m.s OVL 196,2 m/sec ² r.m.s OVL 490,5 m/sec ² r.m.s. VDL 294,3 m/sec ² r.m.s	Keyboard error Output not updated Lines on screen No keyboard response Front end error Module stopped		Component as at +70 °C Reworked component Loose capacitor? Capacitor and cable loose Crystal defect 4 transmitters defect Short in filter
Temperature cycling –20 °C to +85 °C. 10 min dwell time	No weaknesses found after 6,5 cycles			
Combined vibration and temperature cycling 30 g, 40 g and 50 g r.m.s. –20 °C to +85 °C	98,1 m/s ² r.m.s and temp. cycle 294,3 m/s ² r.m.s temp. cycle 294,3 m/s ² r.m.s and +80 °C 490,5 m/s ² r.m.s and –20 °C 490,5 m/s ² r.m.s temp. cycle 490,5 m/s ² r.m.s temp. cycle	Module stopped Keyboard error Module stopped Language change Unable to start Two functions unstable		Troubleshooting Component and reset failed No test possible SW – battery? Module defect Filter failed Further examination required

When the top 10 list of field failures were compared to the failures found during the HALT test it was seen that all failures except one had also been found during the HALT test. The failure that was not found was due to this part of the product not being tested in the HALT chamber.

A.4 HALT test results for a Hi-Fi equipment

The modules were designed for use in an Hi-Fi equipment for domestic use.

Table A.3 – Summary of HALT results for a Hi-Fi equipment

Exposure	Result	Remarks	Possible cause	Action
Low temperature	LOT –55 °C LDT Not found	Noise during change from radio to CD		None
High temperature	UOT Not found UDT Not found	Test stopped at +110 °C due to test cable failure		None
Vibration	OVL 245,25 m/s ² r.m.s. 294,3 m/s ² r.m.s. VDL 343,35 m/s ² r.m.s.	5 components 1 component		Mounting of components
Temperature cycling –55 °C to +100 °C. 30 min dwell time 10 cycles		Incipient stress symptoms at solder joints of heavy components (not critical after 10 cycles)		Solder joints analysed
Combined vibration and temperature cycling 10 g, 20 g, 30 g, 40 g and 50 g r.m.s. –55 °C to +110 °C		Problems regarding CD playing at low temperature		Mounting of 2 components

For more detailed information see [15].

Annex B (informative)

Accelerated reliability compliance and growth test design

B.1 Use environment and test acceleration

To successfully design an accelerated reliability test it is necessary to have a good knowledge of the intended use environment, environmental and operational profile of the product, and product design capabilities. Acceleration of various stresses is a well established technique published in the literature, books and articles (see bibliographic references [3, 4, 6, 8, 9, 10, 12,13]). They are based on the assumption that the test demonstrates the strength of a product regarding the applied environments and operational stresses, and shows whether the tested product/item did have a related failure (success/life test). Using such tests the design can be improved to withstand these stresses (reliability growth test). This methodology is briefly discussed in Clause B.2 while the detailed explanation of the resultant data analysis methodology is explained in Clause B.8.

B.2 Determination of stresses and the stress duration

The product is expected to be reliable regarding each of the applied environmental and operational stresses, thus its overall reliability is the product of individual respective reliabilities. For a predetermined life t_0 , product reliability is then written as:

$$R_{Item}(t_0) = \prod_{i=1}^S R_{Stress_i}(t_i) \quad (B.1)$$

In the above equation $R_{stress,i}$ denotes reliability of the product regarding individual stresses (operational or environmental). Environmental stresses here are those climatic (thermal exposure, thermal cycling, humidity, the ramp rate of the use temperature, etc.) and dynamic (vibration – random or sinusoidal or both, shock – such as potholes for vehicles, transportation, door slam, etc.). Their application and levels depend on product use environments, average and extreme. Other stresses related to product operation which vary with the use profile are included in the group operational stresses, Examples of such operational stresses are: ON/OFF cycling, power stresses, voltage variations, etc.

For the test, a reliability value is allocated to each of the multiples in the expression for the product reliability. The allocated values to reliability regarding individual stresses differ dependent on the product intended use and usage profile and its sensitivity to a particular environment. Reliability value also must be allocated to the interaction factor. The nominal duration of the test for the actual stresses is calculated based on the cumulative damage model and the stress/strength criteria. Here the equivalent test damage occurs by increasing the magnitude of each of the individual stresses, all within the maximum design limits of the product.

In this accelerated reliability test to simulate real life exposure, all of the test units (n) are subject to each of the stresses in the entire test sequence.

Duration necessary for reliability demonstration of an applied stress in test, is denoted as the mean duration of the stress application, μ_{s_j} , which ultimately is to be a factor in the measure of the product demonstrated strength. The Load and stress here are of the same level as their levels in use, but duration of their application is different to produce equivalent cumulative damage.

Since the assumption still is that the stresses applied are of the same level as in actual use, the cumulative damage depends on their duration, Reliability regarding a specific stress, S_i , can be expressed as:

$$R_i = \Phi \left[\frac{S_i \times \mu_{S_i} - S \times \mu_{L_i}}{\sqrt{(S_i \times \mu_{S_i})^2 + (S_i \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad (\text{B.2})$$

Reduced Equation (B.2) becomes:

$$R_i = \Phi \left[\frac{\mu_{S_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(\mu_{S_i})^2 + (\mu_{L_i})^2}} \right] \quad (\text{B.3})$$

For easier determination of the needed applied stress, duration of the applied stress in test is determined as a multiple of the duration of the expected load. This multiplier is chosen as the variable k . The standard deviations can be assumed to be a multiple of their respective mean values if no better information is available.

$$R_i(t_0) = \Phi \left[\frac{\mu_{S_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(a \times \mu_{S_i})^2 + (b \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad (\text{B.4})$$

Simplified, Equation (B.4) then becomes:

$$R_i(t_0, k, \mu_{L_i}) = \Phi \left[\frac{k - 1}{\sqrt{(a \times k)^2 + (b)^2}} \right] \quad (\text{B.5})$$

To investigate how reliability depends on the factor k , the stress duration multiplier, three different assumption cases in Equation (B.5) were plotted in Figure B.1.

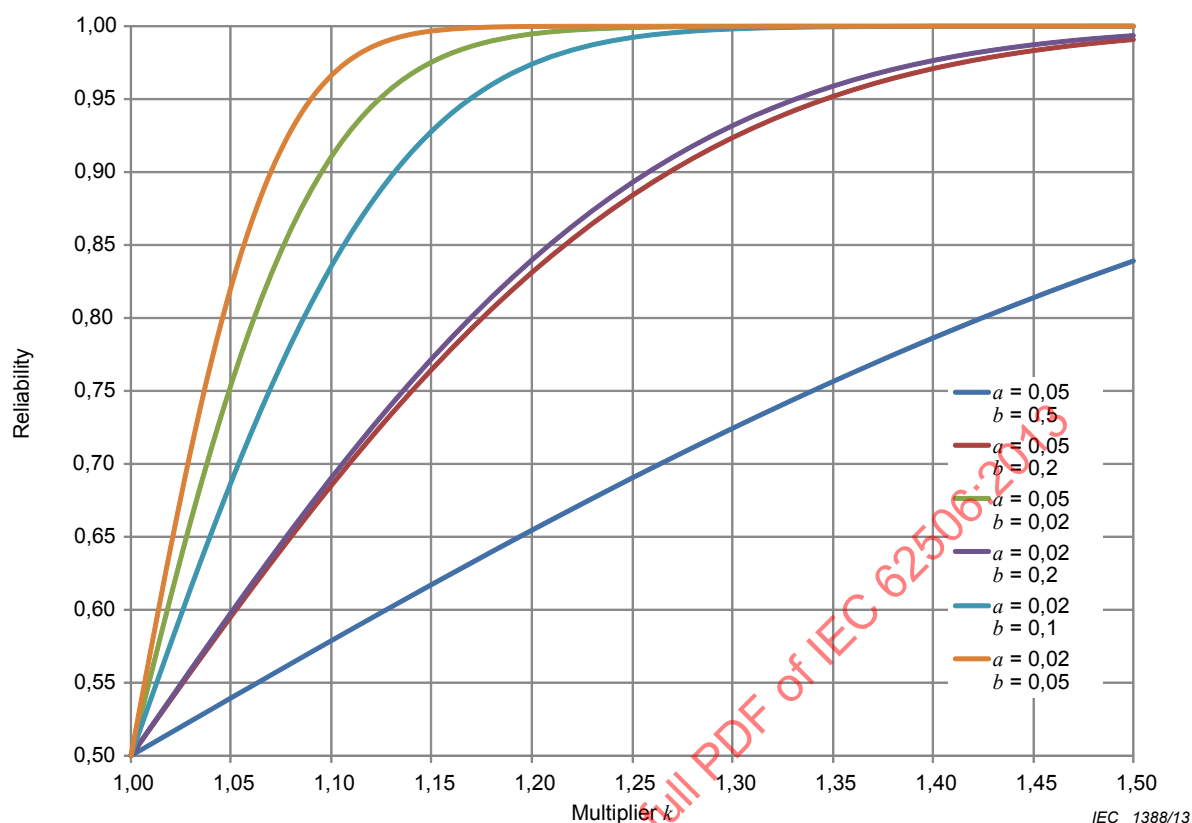


Figure B.1 – Reliability as a function of multiplier k and for combinations of parameters a and b

Figure B.1 shows a plot of the demonstrated reliability ($R_i(t_0)$) for one specific stress. To demonstrate the overall product reliability, this product needs to demonstrate the allocated reliability regarding each of the stresses. Multiplier k defines the increase in test exposure durations to achieve the allocated reliability.

Figure B.2 is plotted for the specific example, where $a = 0,05$, and $b = 0,3$.

The reliability test is designed based on the product usage profile. With that profile the parameters shown in Table B.1 are usually listed. Table B.1 is just an example of some basic stress parameters where the values are given as numerical examples, and not an exhaustive list of all the parameters given as the usage profile.

B.3 Overall acceleration of a reliability test

Regardless of the reliability demonstration test type, the main principle is failure rate acceleration:

$$\lambda_A = A_{Test} \cdot \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_s} \left(A_i \prod_k A_k \cdot \lambda_i \right) \quad (\text{B.6})$$

where

λ_0 is the failure rate that the item has in its use conditions;

λ_A is the accelerated, test, failure rate;

- A_i is the acceleration factor for each of the increased stresses in test;
 λ_i is the failure rate of the item corresponding to the specific stress;
 N_S is the number of stresses;
 $\prod_k A_k$ is the product of acceleration factors of stresses affecting the failure mode i .

Total equivalent test acceleration is:

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \cdot \prod_k A_k \cdot \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad (B.7)$$

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \cdot \prod_k A_k \cdot \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (B.8)$$

Simplified by assumption that equal reliability can be allocated to each of the stresses:

$$\begin{aligned} R_i(t_i) &= R_S(t_0) = \sqrt[N_S]{R_0(t_0)} \\ \lambda_i &= \lambda_S = \text{const} \\ \lambda_0 &= N_S \cdot \lambda_S \end{aligned} \quad (B.9)$$

$$A_{test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \times \prod_k A_k \times \left[\frac{1}{N_S} \times \frac{\lambda_0 \times t_0}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (B.10)$$

Then the overall acceleration factor becomes:

$$A_{Test} = \frac{1}{N_S} \cdot \sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \cdot \prod_k A_k \right) \quad (B.11)$$

B.4 Example of reliability compliance test design

B.4.1 General

Reliability compliance tests are based on the assumption of the constant failure rate or failure intensity. The primary measure of reliability in these tests is mean time to failure, MTTF, or mean time between failures, MTBF; therefore, these tests are applicable for the tests without replacements or repair of the failed units as well as for the tests with replacement or repair of the tested units.

In each case, the tests are based on requirements or goals for reliability as well as for producer and customer risk or confidence in the test results. Table B.1 represents an example of the use environment for an automotive electronic device.

Table B.1 – Environmental stress conditions of an automotive electronic device

Parameter	Symbol	Value
Required life	t_0	10 years = 87 600 h
Required reliability	$R_0(t_0)$	0,8
Time ON	t_{ON}	2 h/day = 7 300 h
Temperature ON	T_{ON}	65 °C
Time OFF	t_{OFF}	22 h/day = 80 300 h
Temperature OFF	T_{OFF}	35 °C
Thermal cycling	ΔT_{Use}	45 °C, twice a day
Total cycles	N_{Use}	7 300
Temperature ramp rate	ξ	1,5 °C/min
Vibrations, random	W_{Use}	16,68 m/s ² r.m.s
Relative humidity	RH_{use}	50 %
Activation energy	E_a	1,2 eV

To ensure as much synergy among different stresses as possible, it usually is the practice to apply multiple stresses during the same test, as many as the test setup equipment or facilities allow. Thus it is often the case that the thermal cycling is combined with the thermal exposure, operational cycling and the applied power. In those cases, the stresses are distributed so that they are spread throughout the duration of such test. For those tests that are not possible or practical to perform simultaneously with others, such as humidity and often vibration, it is recommended that the tests are evenly distributed so that the cumulative damage on the stress units corresponds to that experienced in use.

For the given example in Table B.1, where the required 10 year reliability was 0,8, the corresponding MTBF is:

$$\theta_0 = -\frac{t_0}{\ln(R_0(t_0))} = 392\,000 \text{ h} \quad (\text{B.12})$$

A required test duration could be, depending of how many failures experienced in test, if it was the SPRT Method A8 from the IEC 61124, to about 5 times MTBF, meaning it could be required that the test duration be 2 000 000 h. If there were 50 test units, then the test would have to continue through about 50 000 h (a cost and schedule prohibitive endeavour).

Reliability of the item regarding each of the stresses is:

$$R_i(t_0) = [R_0(t_0)]^{1/4} = 0,946 \quad (\text{B.13})$$

This example uses stress conditions shown in Table B.1.

For the assumed value of constants a and b , 0,05 and 0,2 respectively, the multiplier k is determined from the graph in Figure B.2 to be $k = 1,5$.

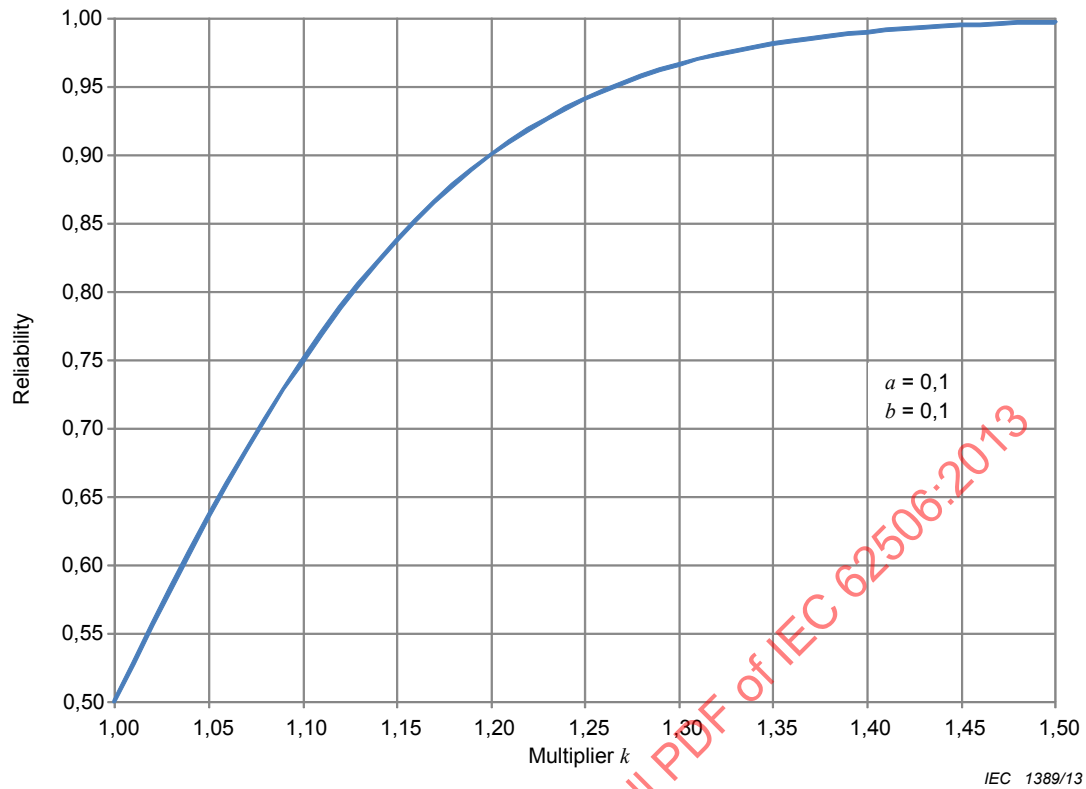


Figure B.2 – Determination of the multiplier k

B.4.2 Thermal cycling

$$\Delta T_{Use} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Test} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{Test} = 105 - (-20) = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\xi_{Use} = 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$$

$$\xi_{Test} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$$

$$m = 2,5$$

$$N_{Test} = N_{Use} \cdot k \cdot \left(\frac{\Delta T_{Use}}{\Delta T_{Test}} \right)^m \cdot \left(\frac{\xi_{Use}}{\xi_{Test}} \right)^{1/3} \quad (\text{B.14})$$

$$N_{Test} = 452 \text{ cycles}$$

B.4.3 Thermal exposure, thermal dwell

Normalize duration at the OFF temperature to the ON conditions:

$$t_{ON_N} = t_{ON} + t_{OFF} \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{OFF} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273} \right) \right] \quad (B.15)$$

$$t_{ON_N} = 8\,754 \text{ hours}$$

Calculate the necessary accelerated test duration:

$$t_{T_Test} = t_{ON_N} \cdot k \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{Test} + 273} \right) \right] \quad (B.16)$$

$$t_{T_Test} = 168,1 \text{ h}$$

For stress synergism, combine thermal exposure with the thermal cycling, distributing the thermal exposure over the high temperature of the thermal cycling to determine thermal dwell at the high temperature.

$$t_{TD} = \frac{t_{T_Test}}{N_{Test}} = 0,37 \text{ h} = 22,3 \text{ min} \quad (B.17)$$

With the ramp rate measured on the device of 10 °C/min and the stabilization time at high and low temperature of 5 min the duration of the thermal cycle will be:

$$\begin{aligned} t_{TC} &= 2 \times (\text{ramp time}) + (\text{stabilization time} + \text{thermal dwell}) + \text{dwell at cold} \\ t_{TC} &= 2 \times \frac{125}{10} + 22,3 + 5 = 52,3 \text{ min} = 0,875 \text{ h} \end{aligned} \quad (B.18)$$

B.4.4 Humidity

Test performed at $RH_{Test} = 95 \%$, and temperature, $T_{RH} = 85 \text{ °C}$ (65 °C chamber + 20 °C internal temperature rise).

Duration of humidity exposure is equal to the normalized temperature exposure, t_{ON_N} .

$$t_{RH_Test_Test} = t_{ON_N} \cdot \left(\frac{RH_{Use}}{RH_{Test}} \right)^h \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{RH} + 273} \right) \right] \quad (B.19)$$

$$h = 2,3$$

$$t_{RH_Test} = 300 \text{ h}$$

where parameter h is exponent for power law humidity acceleration factor.

B.4.5 Vibration test

Required kilometrage for ten years was 240 000 km, which translates into 150 h per axis vibration at 1,7 g r.m.s.

$$W_{Use} = 1,7 \text{ g r.m.s.}$$

$$\begin{aligned} W_{Test} &= 3,2 \text{ g r.m.s.} \\ k &= 1,5 \end{aligned}$$

$$t_{Vib_Test} = k \cdot t_{Vib_Use} \cdot \left(\frac{W_{Use}}{W_{Test}} \right)^w \quad (B.20)$$

With : $w = 4$

$t_{Vib_Test} = 18$ hours per axis

Vibration, when accelerated shall have the same profile (same frequency content) as when not accelerated. A different vibration profile would not allow a meaningful acceleration.

B.4.6 Accelerations summary and overall acceleration

For the four tests accelerated as above, the acceleration factors are as follows:

$$\begin{aligned} A_{TC} &= \left(\frac{\Delta T_{Use}}{\Delta T_{Test}} \right)^m \cdot \left(\frac{\zeta_{Use}}{\zeta_{Test}} \right)^{1/3} = \frac{k \cdot N_{Use}}{N_{Test}} = 24,2 \\ A_{TD} &= \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{OFF} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273} \right) \right] = \frac{k \cdot t_{ON_N}}{t_{T_Test}} = 52,1 \\ A_{RH} &= \left(\frac{RH_{Use}}{RH_{Test}} \right) \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{RH} + 273} \right) \right] = \frac{k \cdot t_{ON_N}}{t_{RH_Test}} = 43,7 \\ A_{Vib} &= \left(\frac{W_{Use}}{W_{Test}} \right)^w = \frac{k \cdot t_{Vib_Use}}{t_{Vib_Test}} = 12,6 \end{aligned} \quad (B.21)$$

To determine overall acceleration factor, it will be assumed that vibration and thermal cycling are stresses that would accelerated the same failure modes, while thermal exposure and humidity would accelerate another failure mode.

The overall acceleration factor would then be:

$$A = \frac{A_{TC} \times A_{Vib} + A_{RH} \times A_{TD}}{S} = 645 \quad (B.22)$$

It is important to notice the difference between the standard practice of multiplying all of the acceleration factors, which would provide an overly estimated overall test acceleration of:

$$A_{SP} = A_{TC} \times A_{Vib} \times A_{RH} \times A_{TD} = 6,92 \times 10^5 \quad (B.23)$$

It is intuitively apparent that this standard practice acceleration is extremely unrealistic and may lead to grossly erroneous reliability conclusions.

The acceleration of test then produces the following result:

$$\lambda_0 = -\frac{\ln[R_0(t_0)]}{t_0} = 2,22 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_{Test} = -\frac{\ln[R_0(t_0)]}{t_0} \cdot A = 1,64 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B.24})$$

Or using MTBF :

$$\theta_0 = 3,93 \cdot 10^5 \text{ hours}$$

$$\theta_{Test} = 608,7 \text{ hours}$$

The compliance test is then to be designed for the above MTBF as a requirement. However, the test will not have to demonstrate the very high required MTBF, $\theta_0 = 3,93 \times 10^5$ h, but the MTBF about 600 times lower MTBF, $\theta_{Test} = 508,7$ h. The accelerated test would have a duration of approximately 3 000 h compared to the non accelerated test that would need a duration of 2 000 000 h.

B.5 Example of accelerated reliability growth test data analysis

B.5.1 General

In this example, the use parameters for an item are given in Table B.2.

Table B.2 – Product use parameters

Stress/Requirement/Property	Symbol/Value	Units
Product life	t_0	h
Time ON	t_a	h/day
Internal temperature when ON	T_{ON}	°C
Internal temperature when OFF	T_{OFF}	°C
Temperature change	ΔT_{use}	°C
Rate of temperature change	ζ_{Use}	°C/min
Number of thermal cycles	c_T	Cycles/day
Temperature rise over the ambient	ΔT	°C
Relative humidity	RH_{Use}	%
Distance travelled in product life	D	Kilometres
Vibration level in use	W_{Use}	g
Operational. (ON/OFF) cycling	c	Cycles/day

To ensure as much synergism among different stresses as possible, it is usually the practice to apply multiple stresses during the same test. Thus it is often the case that the thermal cycling is combined with the thermal exposure, operational cycling and the applied power. In those cases, the stresses are distributed so that they are spread throughout the duration of such test. For those tests that are not possible or practical to perform simultaneously with others, such as humidity and often vibration, it is recommended that the tests are evenly distributed so that the cumulative damage on the stress units corresponds to that experienced in use.

B.5.2 Test acceleration and data analysis

The test is then accelerated using standard acceleration methods.

For data plotting in reliability growth analysis, the necessary information is time to a failure. In a test that is designed such that duration of each stress in the test represents duration of that stress type in life, the units of test performance (cycle, h) need to be translated in the corresponding time in the product life for respective stresses. This is done by test “deceleration” and by conversion of applied test cycles into the real time duration. For the basic stress tests it is done as shown below.

B.5.3 Thermal cycling

In Table B.2, it is shown that the number of thermal cycles was given as n cycles per day. As an example this number could be number of cold starts of a vehicle (usually assumed to be $c_T = 2$). When the product life is given in h and the number of thermal cycles is given in cycles per day, then each thermal cycle in use corresponds to $24/c_T$.

The thermal cycling test is accelerated by increasing the thermal amplitudes of the test, ΔT_{Test} , over the thermal amplitudes expected in use, ΔT_{Use} .

The thermal cycling test acceleration is:

$$A_{TC} = \left(\frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Use}} \right)^m \quad (B.25)$$

The test is then further accelerated by faster rate of temperature change in test, ζ_{Test} , over the rate of change in use, ζ_{Use} .

$$A_{Ramp_Rate} = \left(\frac{\zeta_{Test}}{\zeta_{Use}} \right)^{1/3} \quad (B.26)$$

The total number of accelerated thermal cycles in test is then:

$$N_{TC_Test} = \frac{N_{TC_Use} \cdot k}{A_{TC} \cdot A_{Ramp_Rate}} \quad (B.27)$$

This means that equivalency of x accelerated thermal cycles in test to the time duration, h , in life (having in mind that one thermal cycle in life is $24/n$) is:

$$t_{TC_x} = x \cdot A_{TC} \cdot A_{Ramp_Rate} \cdot \frac{24}{c_T} \quad (B.28)$$

B.5.4 Thermal exposure, thermal dwell

The product in its use can be exposed to several temperatures, dependent on its location, operation, etc. For simplicity, it will be assumed that the product is exposed to only the temperatures, as shown in Table B.1. One is the internal temperature when the product is ON

(t_a h/day of a total of $t_a \times \frac{t_0}{24}$ h), and the other when the product is turned OFF ($24 - t_a$) h/day

or for a total of $(24 - t_a) \times \frac{t_0}{24}$ h.

To determine thermal acceleration, the time when the product is at the second temperature (OFF) will be normalized to the equivalent time at a higher temperature (ON) as follows:

$$t_{TD_Use} = t_a \cdot \frac{t_0}{24} + (24 - t_a) \cdot \frac{t_0}{24} \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{OFF} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273} \right) \right]} \quad (B.29)$$

Thermal acceleration for the test T_{Test} temperature is:

$$A_{TD} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{Test} + 273} \right) \right]} \quad (B.30)$$

The total duration of a thermal exposure (thermal dwell) test is then:

$$t_{TD_Test} = \frac{t_{TD_Use} \cdot k}{A_{TD}} \quad (B.31)$$

If a failure occurs at y h in thermal dwell, then the corresponding time to failure in life will be:

$$t_{TD_y} = A_{TD} \cdot \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \cdot y \quad (B.32)$$

It is usually the case that the thermal dwell is distributed over thermal cycling (N_{TC_test}) and the duration at the high temperature extreme in each thermal cycle is:

$$t_{St} = \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} \quad (B.33)$$

In the above equation, t_{St} is the time at the thermal extremes in test.

The total duration of a thermal cycle is then:

$$t_{TC_Test} \text{ (hours)} = \frac{(T_{Test} - T_{Amb})}{\xi_{Test} \cdot 60} + t_{St} + \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} + \frac{(T_{Test} - T_{Low})}{\xi_{Test} \cdot 60} + t_{Test_Low} + \xi \frac{(T_{Amb} - T_{Low})}{\xi_{Test} \cdot 60} \quad (B.34)$$

To make sure that the test cycling will produce cumulative damage resultant from temperature changes, some time exposure at the cold temperature, cold dwell, t_{test_low} is needed. This time should be equal or greater than the temperature stabilization time for that test item.

When the test data show time to a failure, related to thermal exposure, z , in the accelerated thermal test (as it usually happens in practice) this means that the total hours in thermal dwell are those that need to be correlated to the exposure in use, t_z :

$$t_{TD_z} = \frac{z(h)}{t_{TC_Test}(h)} \cdot \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} \cdot A_{TD} \cdot \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \quad (B.35)$$

B.5.5 Humidity test

During the humidity test, the acceleration is achieved by raising relative humidity in test as well as the test temperature over those expected in use. The thermal acceleration, like in the thermal exposure test, will be determined over the equivalent use time calculated for ON temperature, t_{TD_Use} . Test acceleration for humidity test is:

$$A_H = \left(\frac{RH_{Test}}{RH_{Use}} \right)^h \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{H_Test} + 273} \right) \right]} \quad (B.36)$$

The total duration of humidity test is then:

$$t_{H_Test} = \frac{t_{TD_Use}}{A_H} \quad (B.37)$$

If a humidity failure occurs at w h in humidity test, the equivalent time to a failure in use is:

$$t_{H_w} = A_H \cdot \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \cdot w \quad (B.38)$$

B.5.6 Vibration test

For vibration exposure, D kilometres represent t_0 h of product life.

Usually, non-accelerated, one hour of vibration represents approximately 1 600 km on a vehicle.

Duration of accelerated vibration test (h of test per axis) will be:

$$t_{Vib_Test} = \frac{D}{1600} \cdot \left(\frac{W_{Use}}{W_{Test}} \right)^M$$

$$A_{Vib} = \left(\frac{W_{Test}}{W_{Use}} \right)^M \quad (B.39)$$

In Equation (B.46) the parameter M is the the constant for the vibration acceleration power law. In absence of a constant specific for the test item, it is usually assumed to be: $M = 4$.

A vibration related failure that would occur at v h of vibration (in any of the axes) in the real life represents a failure at t_v h of life:

$$t_{vib_v} = v \times A_{vib} \times \frac{t_0 \times 1600}{D} (h) \quad (B.40)$$

B.5.7 Operational cycling

When the number of operational cycles is given as c per day, then one operational cycle regarding duration in use is $24/c$ h.

Operational cycling is accelerated by time compression as the stress level cannot be increased. Therefore, if a failure occurs at o operational cycles, then the actual time to a failure in use is:

$$t_{OC-o} = \frac{24}{c} \times o \text{ (h)} \quad (\text{B.41})$$

B.6 Test data analysis

B.6.1 General

For data plotting in reliability growth analysis, the necessary information is time to a failure. In a test that is designed such that duration of each stress in the test represents duration of that stress type in life, the units of test performance (cycle, hour) need to be translated in the corresponding time in the product life for respective stresses. This is done by test “deceleration” and by conversion of applied test cycles into the real time duration. For the basic stress tests it is done as shown below.

When corresponding times to failure in use are calculated for each of the failures that occurred in the reliability growth/life test, they are then ordered per increasing value, and analyzed using one of the reliability growth models. The preferred model would be the analytical AMSAA/Crow model, but, in case of a small number of test failures, Duane model can successfully be applied.

In the example shown below, for simplicity, the calculation model is Duane graphical model.

B.6.2 Test data analysis example

Data can be easier analysed if a worksheet is prepared with embedded acceleration equations.

Table B.3 shows the given use profile for the example automotive electronic device.

Table B.4 shows an example of a worksheet prepared for calculations for use times to failures (as would correspond to the product life) when the times to failures are expressed in accelerated test time. This example assumes occurrence of failures in each of the test stresses, except the ON/OFF cycling.

Table B.3 – Assumed product use profile

Parameter/requirement/use	Value
Design life	10 years
Operational time (ON)	2 h per day
Total distance driven	240 000 km
Average daily thermal excursion	45 °C
Random vibration at the location where product is installed	9,81 m/s ²
Rate of temperature change	1,5 °C/min
Number of thermal changes per day (number of vehicle cold starts)	2
Internal temperature when ON	55 °C
Internal temperature when device OFF	25 °C
Average relative humidity in use	50 %

Table B.4 – Worksheet for determination of use times to failures

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	t_0	t_a	T_{ON}	T_{OFF}	E_a	k_B	n	k	m	c_T	h	
2	hours	H/day	°C	°C	eV	eV/K						
3	87 600	2	55,00	25	0,8	8,62E-05	24	1,5		2	3,5	
4	Thermal cycling											
5	ΔT_{Use}	ΔT_{Test}	m	c_T	N_{TC_Use}	A_{TC}	N_{TC_test}	$24/c_T$				
6					$=B3*(\$A\$3/24)$	$=(B7/A7)^{D7}$	$=(E7*\$H\$3)/F7$	$=24/D7$				
7	45	120	2,50	2	7 300	7,11	818,16	12				
8	ζ_{Use}	ζ_{Test}	g	A_{Ramp_rate}								
9				$=(B10/A10)^{C10}$								
10	1,5	10	0,33	1,88								
11	Example: failure within $x = 36$ test cycles											
12	x		$t_{TC_x\ h}$									
13			$= A14*F7*D10*H7$									
14	36		5 781,73									
15	Thermal dwell		$T_{high_chamber}$	ΔT	T_{high}	$T_{low_chamber}$	T_{room}					
16			85,00	20	105	-40	25					
17	t_{TD_Use}					t_0/t_{TD_Use}	A_{TD}					
18	$=(B3/24)*A3+((24-B3)/24)*A3*EXP(-(E3/F3)*((1/(D3+273))-(1/(C3+273))))$					$=A3/A19$	$=EXP((E3/F3)*((1/(C3+273))-(1/(E16+273))))$					
19	11 951,94					7,33	42,21					
20	t_{TD_test}											
21	$=A19*\$H\$3*EXP(-(E3/F3)*((1/(C3+273))-(1/(E16+273))))$											
22	424,705 712											
23	Example: failure occurs 60 h in the thermal dwell h of dwell added											
24	y		$t_{TD_y\ h}$									
25			$=A26*G19*F19$									
26	60		18 563,44									
27	When time to failure recorded as time in thermal cycling:											
28	Temperature cycle duration (h)			t_{St}	T_{test_low}							
29			1 test cycle (h)	0,25	0,25							
30			$=2*(C16-F16)/(B10*60)+((A22/G7)+E29)+(F29)$									
31			1,19									
32												
33	Example: failure occurs within 212 h of thermal cycling											
34	z (h)		t_{TD_z}									
35			$=(A36/C31)*(A22/G7)*G19*(A3/A19)$									
36	212		28 713,96									
37	Humidity											
38	RH_{use}	RH_{test}	t_{TD_use}	T_{H_test}			A_H					
39			$=(B3/24)*A3+((24-B3)/24)*A3*EXP(-(E3/F3)*((1/(D3+273))-(1/(C3+273))))$				$=((B40/A40)^{K3})*EXP((E3/F3)*((1/(C3+273))-(1/(D40+273))))$					
40	50	95	11 951,94	70			32,59					
41												
42	Example											
43	Failure in humidity at $y = 16$ h											
44	w h		$t_{H_w\ h}$									
45			$=A46*G40*(A3/A19)$									
46	16		3 821,33		Life							
47	Vibration											
48	D											
49	150 000											
50	W_{Use}	W_{Test}	M	A_{Vib}	t_{Vib_test}							
51				$=(B54/A54)^{C54}$	$=A51/D54$							
52	14,715	29,43	4,00	16	9 375							
53												
54	Example											
55	Failure in vibration at $v = 3$ h											
56	v (h)		$t_{H_v\ h}$									
57			$=A58*D52*(A3*1000)/A49$									
58	1,5		14 016,00		Hours of life							
59	N_{oc_use}	c	1 cycle									
60		Cycles/day	$=24/B61$									
61		8	3 00									

The times to failures are then ordered per their increasing value. Note that only one value for the thermal dwell has been taken for the reliability calculations (the time in the thermal dwell) as the second number of given time in thermal cycling is shown as an example of different reporting.

Table B.5 shows data as recorded from Table B.5 prepared for Duane graphical analysis.

Table B.5 – Data for reliability growth plotting

Failure	Time to failure h	Cumulative time to failure $n = 24$	$\theta(r)$	$\log(r)$	$\log[\theta(r)]$
1	3 821,33	91 711,92	91 711,92	4,96	4,96
2	5 781,33	138 751,92	69 375,96	5,14	4,84
3	14 016	336 384,00	112 128	5,53	5,05
4	18 563,44	445 522,56	111 380,64	5,65	5,05
t_0^*k	131,400	3 153 600	788 400	6,50	5,90

Figure B.3 shows the plot of the last two columns to determine growth rate, α .

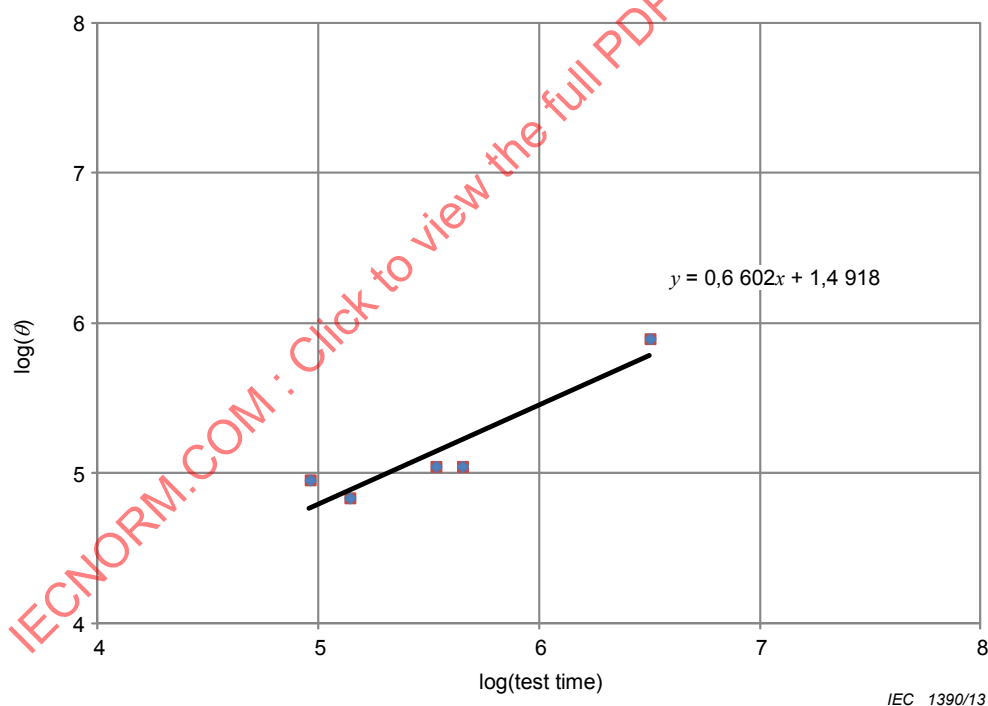


Figure B.3 – Determination of the growth rate

From the data in Table B.5, and the plot in Figure B.3, the results are as follows:

- growth rate, $\alpha = 0,66$;
- final test MTBF: $\theta_{Final} = 1\,431\,964$ h;
- reliability at $t_0 = 87\,600$ h: $R(t_0) = 0,999\,97$.

Annex C (informative)

Comparison between HALT and conventional accelerated testing

Table C.1 – Comparison between HALT and conventional accelerated testing

Test type	Sample size	Test time	Number of failures	Analysis
Classical test	Large (typical 30 to 60)	Very long (months)	Zero or few failures (typical less than 5)	The test is planned so all observed failures should be relevant for field conditions
HALT test	Small (typically 10)	Very short (days)	Several failures (typically 10 or more)	Each failure has to be analysed to evaluate whether it is relevant for field conditions

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

Annex D (informative)

Estimating the activation energy, E_a

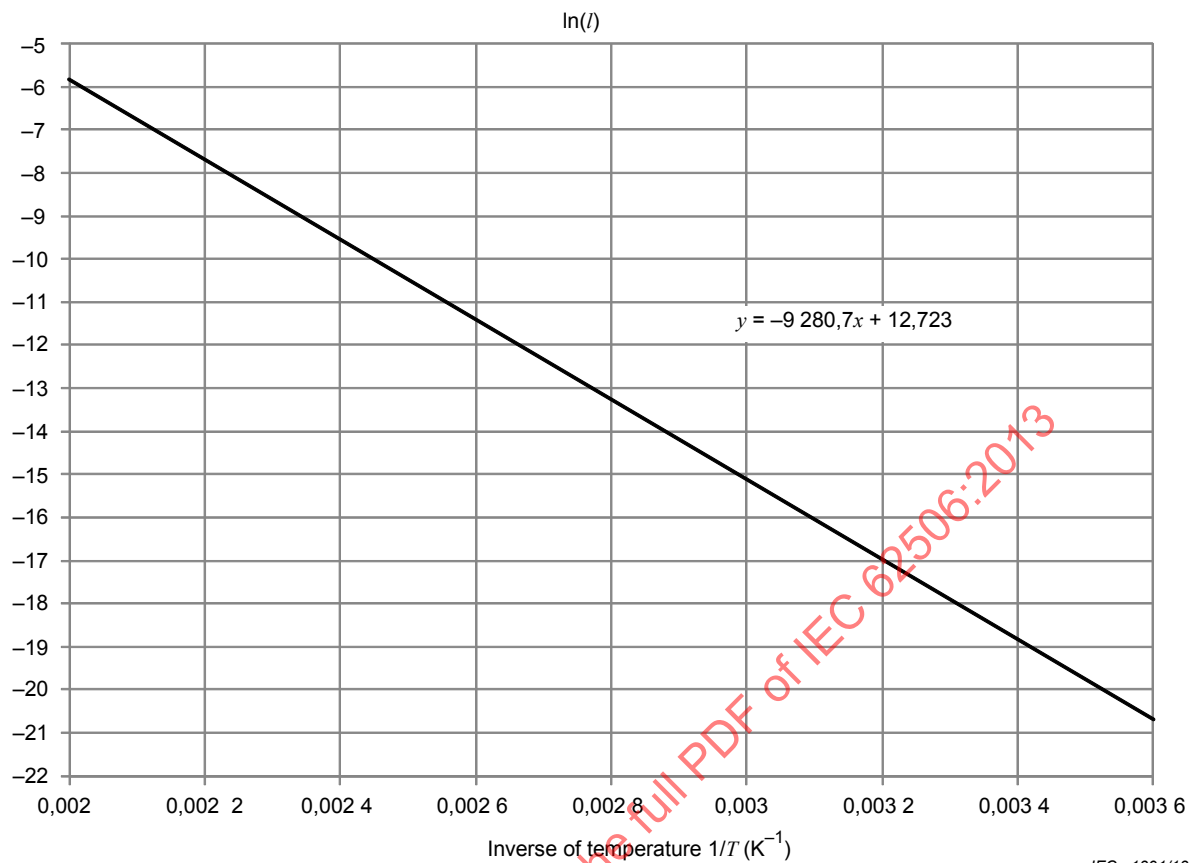
The following example illustrates how the activation energy can be estimated based on a test.

To estimate the activation energy for a typical component like a power amplifier (size 5 mm × 5 mm × 2 mm), and a typical failure rate of 90 failure to time (FIT) in operating condition, the supplier should, for example, test:

- 500 components for 1 year at 100 °C and observe one failure. The failure rate can be calculated as 228 FIT;
- another 300 components for 1 year at 125 °C and observe 3 failures. The failure rate can be calculated as 1 146 FIT;
- another 300 components for 1 year at 140 °C and observe 9 failures. The failure rate can be calculated as 3 465 FIT.

If all failures are caused by the same failure mode the three failure rates can be plotted in a linear-log plot. If the three data points, with an engineering approximation can be modelled with a straight line, the Arrhenius equation applies, and the activation energy E_a is the slope of the straight line as shown in Figure D.1 below:

$$E_a = k_B \times \frac{\ln[\lambda(T)] - \ln[\lambda(T_0)]}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (D.1)$$



IEC 1391/13

Figure D.1 – Plotting failures to estimate the activation energy E_a

From this example it can be clearly seen that estimating the activation energy is very time- and resource consuming. The activation energy should be estimated for each of the significant failure modes active in the component. Therefore the activation energies for the different failure modes are usually only estimated for a new component technology. Often these tests are made on test structures and not on functional components. The estimated activation energies are then used for all components manufactured using that component technology; therefore the user of components should get information on the activation energy of the dominating failure mode(s) from the component manufacturer.

Annex E (informative)

Calibrated accelerated life testing (CALT)

E.1 Purpose of test

The purpose of a calibrated accelerated life test (CALT) is to estimate the reliability or life time of a product based on 3 accelerated tests of a few samples. The procedure is adapted from GMW8758 [16]. There exists commercial software that supports the method.

E.2 Test execution

- Step 1 Based on an engineering evaluation determine the maximum stress level that can be applied in the test without the item failing immediately or after a very short time, or fail with a failure mode not expected in the field. This stress level will be higher than the normal stress level and outside the specifications for the item.
- Step 2 Select a stress level of e.g. 90 % of the level identified in Step 1. This is the high stress level.
- Step 3 Test at least two products at the stress level determined in Step 2 and record the number of cycles to failure or time to failure for each item.
- Step 4 Make a failure analysis of the failures observed in Step 3. If all items fail with the same failure mode then continue with Step 5. If more than one failure mode is observed the test should continue with Step 5 hoping that this Step will identify the dominant failure mode so the non dominating failure mode(s) can be treated as suspended items (see IEC 61649).
- Step 5 Reduce the stress level of Step 2 with e.g. 10 %. This is the medium stress level.
- Step 6 Test at least two products at the stress level determined in Step 5 and record the number of cycles to failure or time to failure each item.
- Step 7 Identify the dominating failure mode and check that it is relevant for the failures expected in the field.
- Step 8 Plot the failures observed in Step 3 and Step 6 in a Weibull plot and determine the characteristic life for the two test samples (see IEC 61649). Plot only the dominant failure mode and treat any deviating failure modes as suspended items. If there is more than one significant failure mode the test has to be performed and analysed for each failure mode separately.
- Step 9 Plot the two characteristic lives against the stress levels on a log-linear scale if the Arrhenius model is expected to be relevant or on a log-log scale if the Inverse power law model is expected relevant.
- Step 10 Extrapolate the line through the two points in the plot down to the expected stress level in the field.
- Step 11 Select a stress level that are as close as possible to the expected stress in the field taking in consideration the trade off between the following two factors: The stress level should be as close to the expected worst case operating conditions ("the severe user") in the field as possible in order to reduce the risk of the extrapolation. On the other hand the stress level should be as high as possible in order to reduce the test time. The chosen stress level is called the low stress level.
- Step 12 Test at least two products at the stress level determined in Step 11 and record the number of cycles to failure or time to failure of each item. If more samples are available it is recommended to test them at this stress level.
- Step 13 Ensure that the same failure mode is dominating the tests at all three stress levels. Other failure modes are regarded as suspensions in this analysis (see

IEC 61649). If more than one failure mode is significant they should be analysed separately.

- Step 14 Plot the failures observed in Step 12 in a Weibull plot and determine the characteristic life for the test samples (see IEC 61649). Plot only the dominant failure mode and treat any deviating failure modes as suspended items. If there is more than one significant failure mode the test have to be performed and analysed for each failure mode separately.
- Step 15 Plot all three characteristic lives on the plot made in Step 9 and superimpose the best fit linear regression line through these three points. Extrapolate the line to the expected stress level in the field.
- Step 16 Read the expected characteristic life at the expected stress level in the field.
- Step 17 Estimate the empirical factors of the acceleration model based on the regression line identified in Step 14.
- Step 18 Transpose the cycles/time to failure for the data points from Step 8 and 14 to the expected stress level in the field, using the relevant acceleration model equations. There will be a different accelerating factor for each data point.
- Step 19 In the remaining analysis the data points estimated in Step 18 are plotted in a Weibull plot (see IEC 61649) as if all the items were tested at the expected stress level in the field. That means that the cycles/time to failure are the times/number of cycles estimated in Step 18 and the sample size is the total number of items tested including those that were suspended.
- Step 20 Add confidence limit to the Weibull curve plotted in Step 19 and read the relevant reliability/time to failure at the expected stress level in the field for the tested items.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

Annex F (informative)

Example on how to estimate empirical factors

A certain component type has been tested with temperature shock. A group A of 22 samples was tested between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. One in this group failed after 700 cycles and 10 after 1 000 cycles. A second test has been performed on 21 samples between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. In this second test group B, 4 failed after 300 cycles, 10 after 400 cycles, and additional 5 after 500 cycles. The failure mode in all cases was delamination in one of the layers. The identical failure mode indicates that Weibull distribution should be applied for data analysis.

Data was analysed using graphical method with a goal that the test data could be fitted with straight lines where the slope would provide the values of shape parameter, and the value of intercept would yield the value of the scale parameter. The derivation of this graphical method starts from the probability of failure:

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

where

c is the number of thermal cycles (the variable);

β is the shape parameter;

η is the scale parameter.

The number of cycles to failure is plotted in a Weibull diagram according to IEC 61649 (see Figure F.1). Two Weibull curves are parallel with a shape parameter value of approximately 4. This also indicates that it is the same failure mode in the two tests.

The equation for the probability of failure is rearranged to ultimately derive a straight line as follows:

$$\begin{aligned} 1 - F(c) &= e^{-\left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta}} \\ \frac{1}{1 - F(c)} &= e^{\left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta}} \\ \ln\left[\frac{1}{1 - F(c)}\right] &= \left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta} \\ \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(c)}\right]\right\} &= \beta \times \ln(c) - \beta \times \ln(\eta) \end{aligned} \quad (\text{F.2})$$

$F(c)$ is determined as median rank of numbers of failure:

$$F(c) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

where

i is the cumulative number of failures at the observed number of cycles;

n is the total number of items in test.

The data is shown in Table F.1.

Table F.1 – Probability of failure of test samples A and B

c	$F_A(c)$	$F_B(c)$
300		0,200935
400		0,668224
500		0,808411
700	0,03125	
1 000	0,120536	

Data transformation for plotting is shown in Table F.2.

Table F.2 – Data transformation for Weibull plotting

$\ln(c)$	$\ln\{\ln[1/(1-F_A(c))]\}$	$\ln\{\ln[1/(1-F_B(c))]\}$
5,703782		-1,494715295
5,991465		0,098302188
6,214608		0,502231166
6,55108	-3,449903552	
6,907755	-2,052275323	

The Weibull plot is shown in Figure F.1.

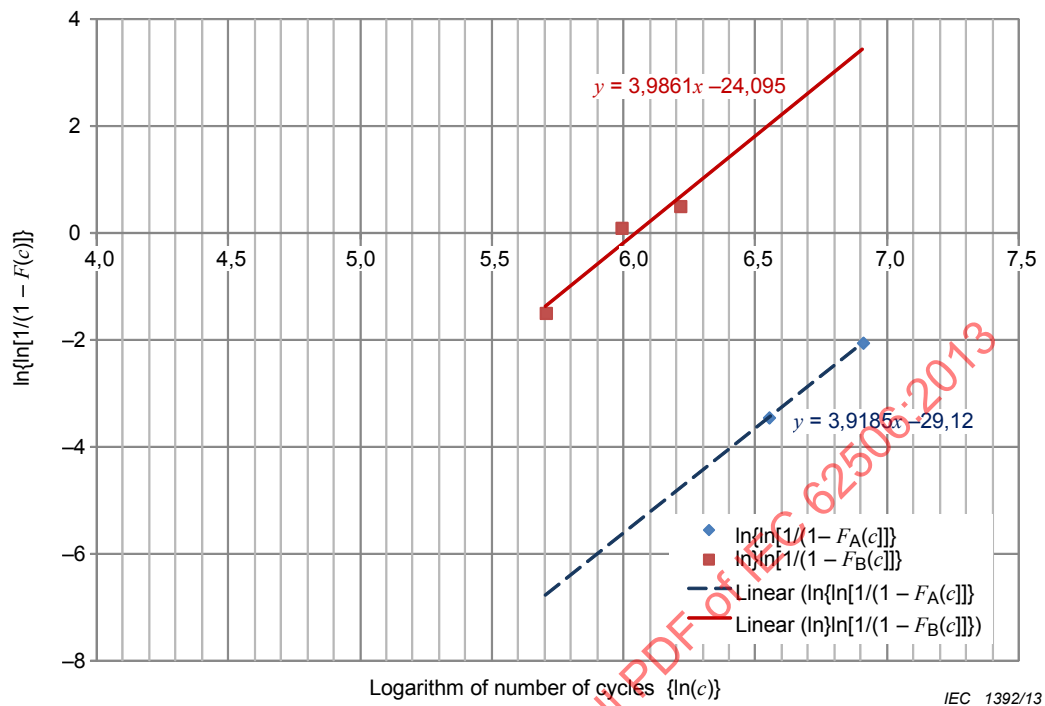


Figure F.1 – Weibull graphical data analysis

Equations of the linear data fit show values of the shape parameters as the slope, and the intercept is the negative product of the shape parameter and the logarithm of the scale parameter.

Slopes of the two lines fitting test data have very similar values, confirming that the failure modes were indeed identical. The common value of the shape parameter is assumed to be:

$$\beta = 0,95$$

Scale parameter is then determined as:

$$\beta \cdot \ln(\eta) = -\text{intercept}$$

$$\eta = e^{\frac{-\text{intercept}}{\beta}} \quad (\text{F.3})$$

From Equation (F.3), the scale parameters determined for the two tests are as follows:

$$\eta_A = 8\,231 \text{ cycles}$$

$$\eta_B = 446 \text{ cycles}$$

Thermal cycling acceleration, A_{190_125} between $\Delta T_B = 190^\circ\text{C}$ and $\Delta T_A = 125^\circ\text{C}$ is:

$$A_{\Delta T_B - \Delta T_A} = \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A} \right)^m = \frac{\eta_A}{\eta_B} \quad (\text{F.4})$$

Solving for the exponent m , which is a characteristic of the test items:

$$A_{\Delta T_B - \Delta T_A} = \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A} \right)^m = \frac{\eta_A}{\eta_B}$$

$$m = \frac{\ln \left(\frac{\eta_A}{\eta_B} \right)}{\ln \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A} \right)} \quad (\text{F.5})$$

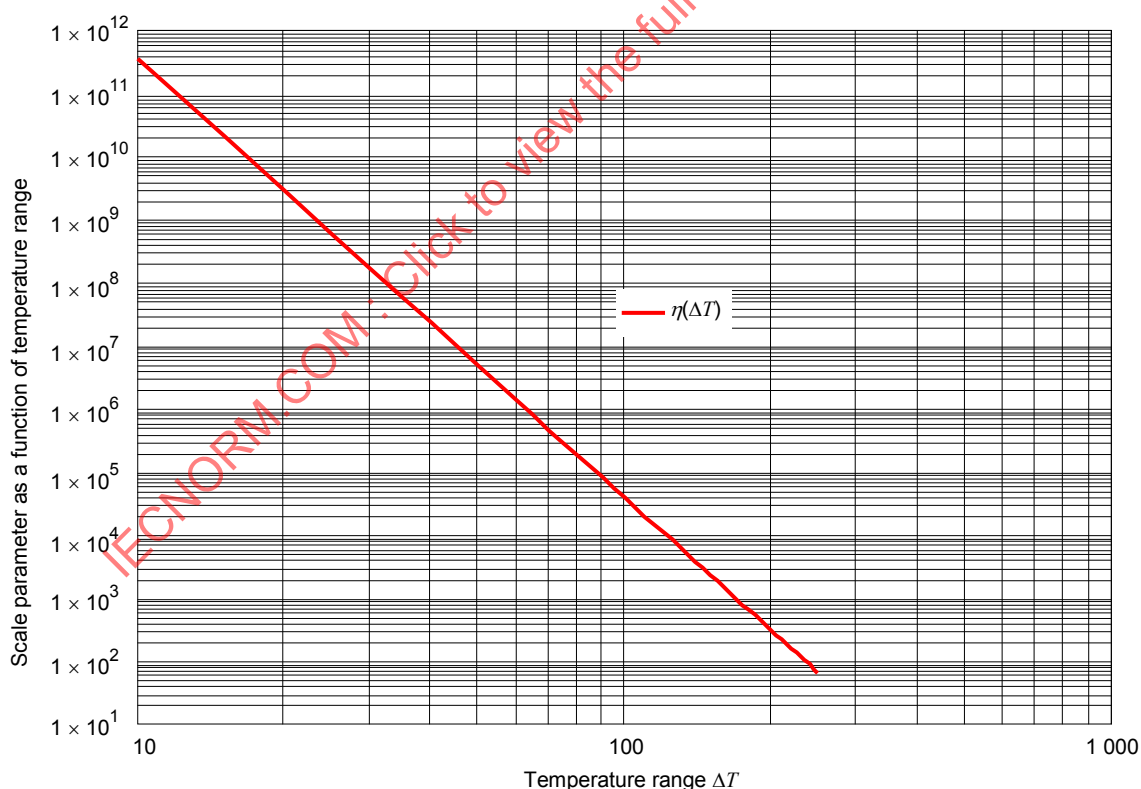
In this example, the value of parameter m is calculated to be

$$m = 6,96$$

To determine a scale parameter for any temperature range of thermal cycling, ΔT :

$$\eta(\Delta T) = \eta_B \times \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T} \right)^m \quad (\text{F.6})$$

Scale parameter as a function of thermal cycling temperature range is shown in Figure F.2.



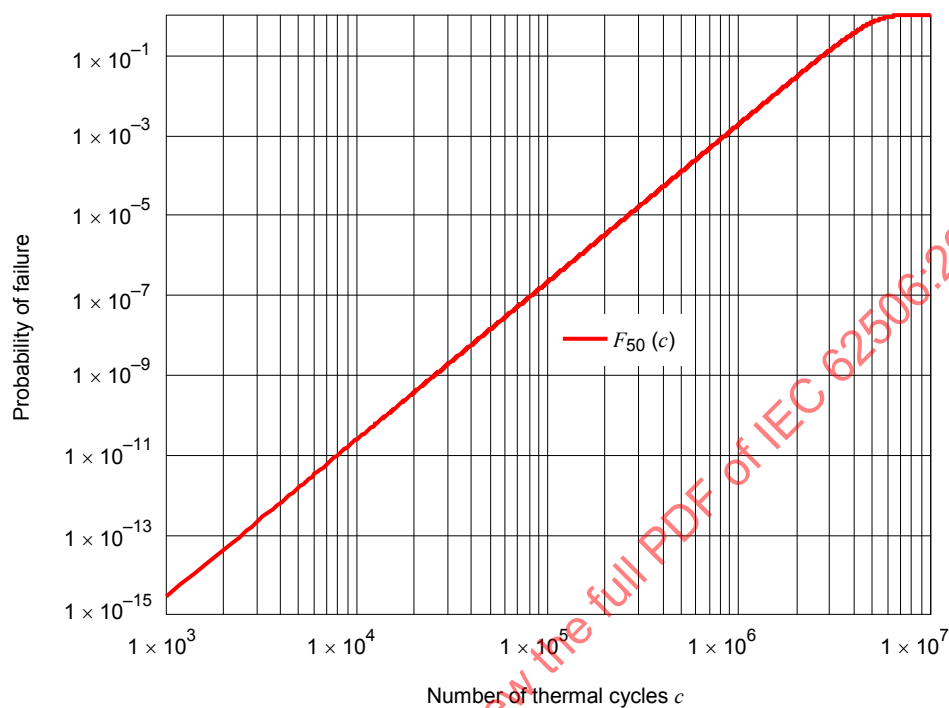
IEC 1393/13

Figure F.2 – Scale parameter as a function of the temperature range

To calculate the scale parameter corresponding to the thermal cycling in use of $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\eta(50) = 446 \times \left(\frac{190}{50} \right)^{6,96} = 4,838 \times 10^6 \quad (\text{F.7})$$

For the temperature cycling range of 50 °C (in use) probability of failure as a function of the number of cycles is shown in Figure F.3.



IEC 1394/13

Figure F.3 – Probability of failure as a function of number of cycles $\Delta T = 50$ °C

As an example, if an item (product) is exposed to a temperature range of 50 °C, probability of failure after a million cycles would be approximately 10^{-3} , meaning that one in a thousand items might fail after one million cycles.

Annex G (informative)

Determination of acceleration factors by testing to failure

G.1 Failure modes and acceleration factors

Single acceleration factors are most meaningful when expressing the process acceleration of a single failure mode. The overall acceleration factor from one set of combined stresses to another is determined in the same manner as described in 5.5.

A single stress type is applied at several (a minimum of three) levels, each on a single group of components. The test duration is determined by components' failures, i.e. the test continues until all or the majority of components fail. Times to failure are recorded for each of the components at each of the stress levels, and the appropriate failure distributions are constructed. The scale parameters of those distributions are plotted for each of the stress levels, and the values are then fitted with a function which is best fitted for the values as a function of the applied stress levels. The ratio of the scale parameter vs. the ratio of the stress levels determines the acceleration factor.

G.2 Determination of acceleration factor, example

A voltage acceleration factor was determined for a semiconductor (power transistor) by test at three voltages as shown in Table G.1.

Table G.1 – Voltage test failure data for Weibull distribution

Failure no.	Time to failure t_h	$F(t)$	$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/(1-F(t))))$
1	100	0,07	4,61	-2,66
2	180	0,16	5,19	-1,72
3	240	0,26	5,48	-1,20
4	290	0,36	5,67	-0,82
5	335	0,45	5,81	-0,51
6	377	0,55	5,93	-0,23
7	420	0,64	6,04	0,03
8	450	0,74	6,11	0,30
9	470	0,84	6,15	0,59
10	485	0,93	6,18	0,99
1	600	0,07	6,40	-2,66
2	1 100	0,16	7,00	-1,72
3	1 580	0,26	7,37	-1,20
4	2 030	0,36	7,62	-0,82
5	2 430	0,45	7,80	-0,51
6	2 810	0,55	7,94	-0,23
7	3 160	0,64	8,06	0,03
8	3 460	0,74	8,15	0,30
9	3 710	0,84	8,22	0,59
10	3 910	0,93	8,27	0,99

Failure no.	Time to failure t_h	$F(t)$	$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/(1-F(t))))$
1	1 800	0,07	7,50	-2,66
2	3 500	0,16	8,16	-1,72
3	5 000	0,26	8,52	-1,20
4	6300	0,36	8,75	-0,82
5	7 450	0,45	8,92	-0,51
6	8 450	0,55	9,04	-0,23
7	9 300	0,64	9,14	0,03
8	10 080	0,74	9,22	0,30
9	10 730	0,84	9,28	0,59
10	11 330	0,93	9,34	0,99

The data was plotted as Weibull distribution, shown in Figure G.1, and the trend lines were drawn. Good linear fit indicated that the times to failure were Weibull distributed, and the process was the same (very similar shape parameters), meaning that the failure mechanism was the same.

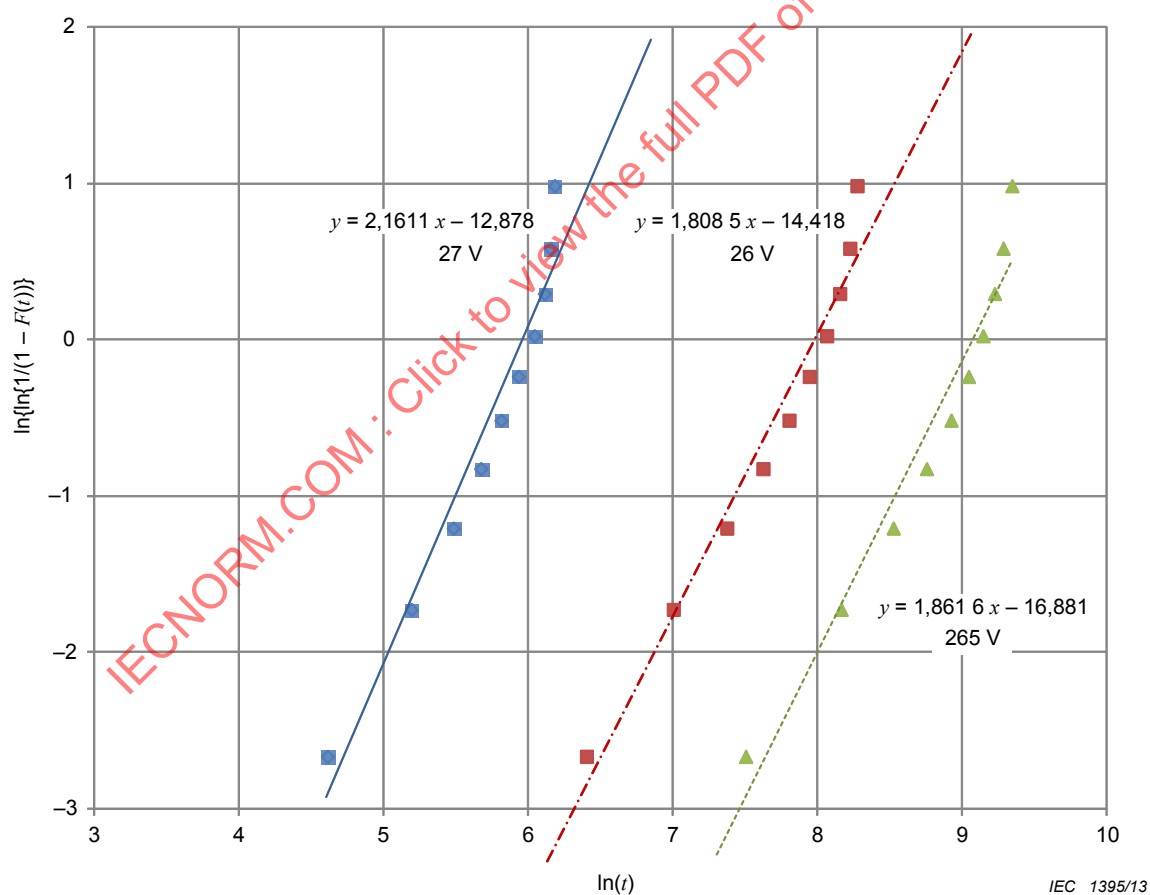


Figure G.1 – Weibull plot of the three data sets

From the equations shown in Figure G.1, the three values of scale parameter were determined, and the plot is shown in Figure G.2.

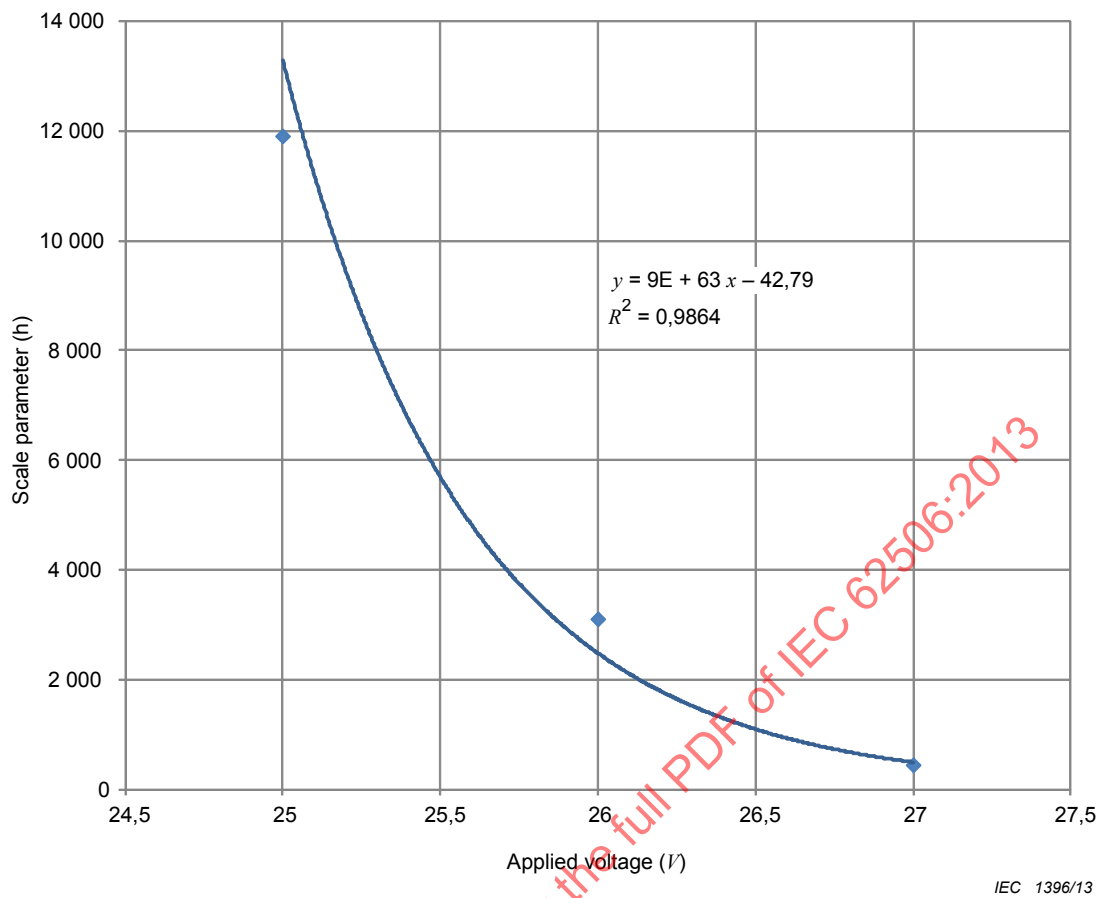


Figure G.2 – Scale parameters' values fitted with a power line

The equation of the power line provides then values of the scale parameter as a function of voltage as:

$$\eta(V) = A \times 10^{B \times V^{-m}} \quad (\text{G.1})$$

The acceleration factor here is:

$$A(V) = \frac{10^{B \times \ddot{V}_2^{-m}}}{10^{B \times \ddot{V}_1^{-m}}} \quad (\text{G.2})$$

Bibliography

- [1] IEC 60050-191:—*International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 191: Dependability and quality of service*³
- [2] IEC 60812, *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*
- [3] HU, J.M., BARKER, D., DASGUPTA, A., ARORA, A., *The Role of Failure Mechanism Identification in Accelerated Testing, Journal of the Institute of Environmental Science*, pp.39-45, July 1993
- [4] NELSON, Wayne, *Accelerated Testing: Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1990, 2004
- [5] GHOSH, B.K. and SEN, P.K., *Handbook of Sequential Analysis*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [6] *Accelerated Life Testing Analysis*, ALTA, Reference, ReliaSoft Publishing, Tucson, Arizona, 2007
- [7] PUNCH, J. and LOLL, V. *Graphical Analysis and Guidelines for Step-Stress Testing*, RAMS 2003.
- [8] KRASICH, M. *Accelerated Testing for Demonstration of Product Lifetime Reliability*, Reliability and Maintainability Symposium 2002
- [9] KRASICH, M., *Accelerated Reliability Growth Testing and Data Analysis*, Reliability and Maintainability Symposium 2008, Las Vegas, Nevada
- [10] KRASICH, M., *How to design Reliability Demonstration and Assurance Tests and Analyze Test Data Using Physics of Failure Principles*, Reliability and Maintainability Symposium 2010
- [11] IEC 60605-7:1978, *Equipment reliability testing – Part 7: Compliance test plans for failure rate and mean time between failures assuming constant failure rate* (withdrawn 1999)⁴
- [12] KRASICH, M. 2009, *Realistic Reliability Requirements for Stresses in Use*, Journal of the IEST, 52 (2): 00-00
- [13] KRASICH, M. 2007, *Accelerated Reliability Growth Testing and Data*, Journal of the IEST, 50 (2): 98-117
- [14] SALMELA, Olli; ANDERSSON, Klas; PERTTULA, Altti; SÄRKKÄ, Jussi, and TAMMENMAA, Markku, *Re-calibration of Engelmaiers Model for leadless, Leadfree Solder Attachments*, QRE 2007 Vol. 23:415-429
- [15] OTTO, Susanne: *HALT & HASS –when and how is it relevant?*, – SPM-169 – June 2004 www.delta.dk/spm

³ The second edition of IEC 60050-191 is due to be published shortly.

⁴ Replaced by IEC 61124.

- [16] GMW8758, *Calibrated Accelerated Life testing (CALT)* – General Motors Corporation October 2004
- [17] CARUSO, H. and DASGUPTA, A., *A Fundamental Overview of Accelerated Testing Analytic Models*, RAMS 1998
- [18] KRASICH, M. 2004, *Accelerated Testing for Demonstration of Product Lifetime Reliability*, Journal of the IEST, 47 (2): 48-58
- [19] SILVERMAN, M, 2010, *How Reliable is Your Product? 50 Ways to Improve your Product Reliability*. Superstar Press, 2010.
- [20] MIL-HDBK-189, *Reliability growth testing*
- [21] MIL-HDBK-78, *Reliability test methods*
- [22] IEC 61125:1992, *Unused hydrocarbon-based insulating liquids – Test methods for evaluating the oxidation stability*
- [23] JESD22-A110, *Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (HAST)*
- [24] JEDEC JESD-A113, *Preconditioning of Nonhermetic Surface Mount Devices Prior to Reliability Testing*
- [25] JESD47B, *Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits*
- [26] JESD74, *Early Life Failure Rate Calculation Procedure for Electronic Components*
- [27] JESD85, *Methods for Calculating Failure Rates in Units of FITs*
- [28] JEDEC JESD A104-B, *Temperature cycling*

Additional non-cited references

IEC 61703:2001, *Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	93
INTRODUCTION	95
1 Domaine d'application	96
2 Références normatives	96
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	97
3.1 Termes et définitions	97
3.2 Symboles et abréviations	99
4 Description générale des méthodes d'essai accéléré	100
4.1 Modèle de cumul des dommages	100
4.2 Classification, méthodes et types d'accélération d'essai	103
4.2.1 Généralités	103
4.2.2 Type A, essais accélérés qualitatifs	104
4.2.3 Type B: essais accélérés quantitatifs	104
4.2.4 Type C: essais quantitatifs de compression temporelle et d'événements	105
5 Modèles d'essais accélérés	106
5.1 Type A: essais accélérés qualitatifs	106
5.1.1 Essais aux limites hautement accélérés (HALT)	106
5.1.2 Essais sous contrainte hautement accélérés (HAST)	111
5.1.3 Déverminage/audit sous contrainte hautement accéléré (HASS/HASA)	112
5.1.4 Aspects techniques de HALT et de HASS	113
5.2 Types B et C – Méthodes d'essais accélérés quantitatifs	113
5.2.1 Objectif des essais accélérés quantitatifs	113
5.2.2 Fondement physique des méthodes d'essais accélérés quantitatifs de Type B	114
5.2.3 Essais de Type C, compression temporelle (C_1) et des événements (C_2)	115
5.3 Mécanismes de défaillance et conception des essais	117
5.4 Détermination des niveaux de contrainte, profils et combinaisons en utilisation et en essai – Modélisation des contraintes	118
5.4.1 Généralités	118
5.4.2 Méthode pas-à-pas	118
5.5 Méthode d'accélération de contraintes multiples – Essais de Type B	119
5.6 Accélération de contraintes uniques et multiples pour des essais de Type B	121
5.6.1 Méthode d'accélération de contraintes uniques	121
5.6.2 Modèles de contraintes variables en fonction du temps – Essais de Type B	129
5.6.3 Modèles de contraintes dépendant de la répétition des applications de contraintes – Modèles de fatigue	131
5.6.4 Autres modèles d'accélération – Compression temporelle et compression d'événements	132
5.7 Accélération d'essais de fiabilité quantitatifs	133
5.7.1 Exigences, objectifs et profils d'utilisation de la fiabilité	133
5.7.2 Démonstration de fiabilité ou essais de durée de vie	135
5.7.3 Essais de composants pour une mesure de la fiabilité	140
5.7.4 Mesures de fiabilité pour des composants et des systèmes/entités	141
5.8 Essais accélérés de conformité ou d'évaluation de la fiabilité	142

5.9	Essais accélérés de croissance de fiabilité	143
5.10	Principes directeurs des essais accélérés	144
5.10.1	Essais accélérés pour des contraintes multiples et le profil d'utilisation connu	144
5.10.2	Niveau de contraintes accélérées	144
5.10.3	Essais accélérés de fiabilité et de vérification	144
6	Stratégie d'essais accélérés pour le développement du produit	145
6.1	Plan d'échantillonnage d'essais accélérés	145
6.2	Discussion générale concernant les contraintes et durées d'essai	146
6.3	Essais de composants soumis à des contraintes multiples	146
6.4	Essais accélérés d'ensembles	147
6.5	Essais accélérés de systèmes	147
6.6	Analyses des résultats d'essais	147
7	Limites des méthodes d'essais accélérés	147
Annexe A (informative)	Essai aux limites hautement accéléré (HALT)	149
Annexe B (informative)	Conception d'un essai accéléré de conformité et de croissance de la fiabilité	154
Annexe C (informative)	Comparaison entre essais HALT et essais accélérés classiques	170
Annexe D (informative)	Estimation de l'énergie d'activation, E_a	171
Annexe E (informative)	Essai de durée de vie accéléré étalonné (CALT)	173
Annexe F (informative)	Exemple de méthode d'estimation des facteurs empiriques	175
Annexe G (informative)	Détermination des facteurs d'accélération par des essais de défaillance	180
Bibliographie		183
Figure 1	– Fonctions de densité de probabilité (PDF – probability density function) pour dommages cumulés, dégradation et types d'essais	101
Figure 2	– Relations de PDF de la robustesse du produit en fonction de la charge en cours d'utilisation	108
Figure 3	– Manière dont l'incertitude de la charge et de la robustesse affecte la politique d'essai	109
Figure 4	– PDF des limites de fonctionnement et de destruction en fonction de la contrainte appliquée	110
Figure 5	– Tracé du modèle de réaction d'Arrhenius	125
Figure 6	– Tracé de détermination de l'énergie d'activation	127
Figure 7	– Multiplicateur de la durée de contrainte d'essai pour les essais exigés de démonstration de fiabilité (de conformité) ou de croissance de la fiabilité	138
Figure 8	– Multiplicateur de durée d'application de la charge pour la fiabilité requise	139
Figure B.1	– Fiabilité en fonction du multiplicateur k et pour des combinaisons de paramètres a et b	156
Figure B.2	– Détermination du multiplicateur k	159
Figure B.3	– Détermination du taux de croissance	169
Figure D.1	– Tracé des défaillances pour estimation de l'énergie d'activation E_a	172
Figure F.1	– Analyse des données selon la méthode graphique de Weibull	177
Figure F.2	– Paramètre d'échelle en fonction de la plage de températures	178
Figure F.3	– Probabilité de défaillance en fonction du nombre de cycles $\Delta T = 50\text{ °C}$	179

Figure G.1 – Tracé de Weibull des trois jeux de données.....	181
Figure G.2 – Valeurs des paramètres d'échelle sur une ligne de puissance	182
Tableau 1 – Mise en correspondance des types d'essais avec le cycle de développement du produit.....	103
Tableau A.1 – Résumé des résultats d'essai HALT pour un convertisseur continu-continu.....	151
Tableau A.2 – Résumé des résultats d'essai HALT pour un matériel médical	151
Tableau A.3 – Résumé des résultats d'essai HALT pour une chaîne stéréophonique	153
Tableau B.1 – Conditions de contraintes environnementales d'un dispositif électronique de l'industrie automobile	158
Tableau B.2 – Paramètres d'utilisation du produit	162
Tableau B.3 – Hypothèse de profil d'utilisation du produit	167
Tableau B.4 – Feuille de calcul pour la détermination des durées de fonctionnement avant défaillance.....	168
Tableau B.5 – Données pour le tracé des données de croissance de la fiabilité	169
Tableau C.1 – Comparaison entre essais HALT et essais accélérés classiques	170
Tableau F.1 – Probabilité de défaillance des échantillons d'essai A et B.....	176
Tableau F.2 – Conversion des données pour le tracé de Weibull	176
Tableau G.1 – Données de défaillance d'essai en tension pour une loi de distribution de Weibull.....	180

IECNORM.COM : Click to view the full PDF at IECNORM.COM

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODES D'ESSAIS ACCÉLÉRÉS DE PRODUITS

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 62506 a été établie par le comité d'études 56 de la CEI: Sûreté de fonctionnement.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
56/1503/FDIS	56/1513/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.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62506:2013

INTRODUCTION

De nombreuses méthodes d'essai préalables de fiabilité ou de défaillance ont été développées et la plupart d'entre elles sont actuellement en cours d'utilisation. Ces méthodes permettent de déterminer la fiabilité du produit ou d'identifier d'éventuels modes de défaillance des produits et ont été considérées efficaces pour démontrer la fiabilité:

- essais à durée fixe,
- essais progressifs à taux de probabilité,
- essais de croissance de fiabilité,
- essais jusqu'à défaillance, etc.

Bien que très utiles, ces essais étaient en général longs, notamment lorsqu'il fallait démontrer une fiabilité élevée du produit. La réduction des périodes qui précèdent la mise sur le marché ainsi que la compétitivité de coût des produits rendent d'autant plus impérative la nécessité de disposer d'essais accélérés efficaces et efficaces. De ce fait, la durée des essais est raccourcie en appliquant des niveaux de contrainte plus importants ou en augmentant la vitesse d'application des contraintes récurrentes, ce qui permet une évaluation plus rapide et une meilleure fiabilité du produit en décelant ces modes de défaillance et en atténuant leurs effets.

La fiabilité est appréhendée selon deux approches distinctes et différentes:

- la première consiste à vérifier, par des analyses et des essais, qu'il n'existe pas de modes de défaillance potentiels dans le produit qui risquent d'apparaître au cours de la durée de vie prévue du produit, dans les conditions de fonctionnement prévues;
- la seconde consiste à estimer le nombre de défaillances supposées après un certain temps, dans les conditions de fonctionnement prévues.

L'essai accéléré est une méthode qui convient dans les deux cas, mais elle est utilisée de manière tout à fait différente. La première approche correspond à des essais accélérés qualitatifs dont l'objectif est d'identifier les modes de défaillance potentiels qui pourraient à terme entraîner des défaillances sur site du produit. La seconde approche correspond à un essai accéléré quantitatif qui permet d'estimer la fiabilité du produit sur la base des résultats d'essais de simulation accélérés qui peuvent être corrélés à l'environnement et au profil d'utilisation.

Les essais accélérés peuvent être appliqués à de multiples niveaux matériels et logiciels. Différents types d'essais de fiabilité, tels que les essais à durée fixe, les essais progressifs jusqu'à défaillance, les essais pour une proportion de succès, les essais de démonstration de la fiabilité ou les essais de croissance/amélioration de la fiabilité, peuvent être utilisés comme méthodes d'essais accélérés. La présente norme fournit des recommandations concernant des types choisis d'essais accélérés, couramment utilisés. Il convient que la présente norme soit utilisée conjointement aux normes de plans d'essais statistiques telles que la CEI 61123, la CEI 61124, la CEI 61649 et la CEI 61710.

Il convient que l'équipe de conception du produit examine les avantages relatifs des diverses méthodes et de leur applicabilité individuelle ou combinée pour l'évaluation d'un système ou d'une entité donnée (y compris des techniques de sûreté de fonctionnement) avant de sélectionner une méthode d'essai spécifique ou une combinaison de méthodes. Pour chaque méthode, il convient également de tenir compte de la durée de l'essai, des résultats obtenus, de leur crédibilité et des données requises pour effectuer une analyse significative, ainsi que de l'impact sur le coût du cycle de vie, de la complexité de l'analyse et d'autres facteurs identifiés.

MÉTHODES D'ESSAIS ACCÉLÉRÉS DE PRODUITS

1 Domaine d'application

La présente Norme Internationale fournit des recommandations pour l'application de diverses techniques d'essais accélérés permettant de mesurer ou d'améliorer la fiabilité des produits. L'identification des modes de défaillance potentiels qui pourraient être rencontrés lors de l'utilisation d'un produit/entité donné(e) et la manière d'y remédier contribuent à assurer la sûreté de fonctionnement d'une entité.

L'objectif est soit d'identifier les faiblesses potentielles de la conception et fournir des informations sur la sûreté de fonctionnement de l'entité, soit d'atteindre l'amélioration nécessaire de la fiabilité/disponibilité, dans les deux cas en comprimant ou en accélérant la période d'essai requise. La présente norme couvre les essais accélérés de systèmes non réparables et réparables. Elle peut être utilisée pour des essais progressifs à taux de probabilité, des essais à durée fixe et des essais d'amélioration/croissance de la fiabilité, lorsque la mesure de la fiabilité peut être différente de la probabilité normalisée d'occurrence de défaillance.

La présente norme décrit également des méthodes d'essais accélérés ou de déverminage de la production qui permettraient d'identifier les faiblesses induites par une éventuelle erreur de fabrication du produit et qui risqueraient de ce fait d'en compromettre la sûreté de fonctionnement.

2 Références normatives

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

CEI 60068 (toutes les parties), *Essais d'environnement*

CEI 60300-3-1:2003, *Gestion de la sûreté de fonctionnement – Partie 3-1: Guide d'application – Techniques d'analyse de la sûreté de fonctionnement – Guide méthodologique*

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

CEI 60605-2, *Essais de fiabilité des équipements – Partie 2: Conception des cycles d'essai*

CEI 60721 (toutes les parties), *Classification des conditions d'environnement*

CEI 61014:2003, *Programmes de croissance de fiabilité*

CEI 61164:2004, *Croissance de la fiabilité – Tests et méthodes d'estimation statistiques*

CEI 61124:2012, *Essais de fiabilité – Plan d'essais de conformité d'un taux de défaillance constant et d'une intensité de défaillance constante*

CEI 61163-2, *Déverminage sous contraintes – Partie 2: Composants électroniques*

CEI 61649:2008, *Analyse de Weibull*

CEI 61709, *Composants électroniques – Fiabilité – Conditions de référence pour les taux de défaillance et modèles de contraintes pour la conversion*

CEI 61710, *Modèle de loi en puissance – Test d'adéquation et méthodes d'estimation des paramètres*

CEI 62303, *Instrumentation pour la radioprotection – Matériel pour la surveillance du tritium atmosphérique*

IEC/TR 62380, *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*
(disponible en anglais seulement)

CEI 62429, *Croissance de fiabilité – Essais de contraintes pour révéler les défaillances précoces d'un système complexe et unique*

3 Termes, définitions, symboles et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050-191:—, ainsi que les suivants, s'appliquent.

NOTE Les symboles utilisés pour les mesures de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité correspondent, le cas échéant, à ceux définis dans la CEI 50060-191:1990.

3.1 Termes et définitions

3.1.1 entité

sujet à l'étude

Note 1 à l'article: L'entité peut être une partie individuelle, un composant, un dispositif, une unité fonctionnelle, un équipement, un sous-système ou système.

Note 2 à l'article: Une entité peut être constituée de matériel, de logiciel, de personnel ou une combinaison de ces éléments.

Note 3 à l'article: L'entité est souvent constituée d'éléments que l'on peut considérer individuellement. Voir "sous-entité" (191-41-02) et "niveau d'intervention" (191-41-05).

Note 4 à l'article: La CEI 60050-191:1990, première édition, identifiait le terme "entité" comme un synonyme ce qui ne concerne pas toutes les applications.

Note 5 à l'article: La définition donnée pour «entité» dans la première édition s'apparente davantage à une description qu'à une définition. Cette nouvelle définition appliquée dans toute la norme constitue un élément plus significatif. La formulation de l'ancienne définition est reportée dans la nouvelle note 1.

[SOURCE: CEI 60050-191:—, définition 191-41-01] [1]¹

3.1.2

contrainte échelonnée

essai sous contrainte échelonnée

essai au cours duquel la contrainte appliquée est augmentée, après chaque intervalle spécifié, jusqu'à ce qu'une défaillance se produise ou qu'un niveau de contrainte prédéterminé soit atteint

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

Note 1 à l'article: Les 'intervalles' peuvent être spécifiés en termes de nombre d'applications de contraintes, de durées ou de séquences d'essai.

Note 2 à l'article: Il convient que l'essai n'affecte pas les modes de défaillance de base, les mécanismes de défaillance ou leur prévalence relative.

[SOURCE: CEI 60050-191 :—, définition 191-49-10]

3.1.3

facteur d'accélération

rapport entre les caractéristiques de distribution des défaillances d'une entité ou les mesures de fiabilité (par exemple les intensités de défaillance) d'une entité lorsqu'elle est soumise à des contraintes dans les conditions d'utilisation prévue et celles que l'entité acquiert lorsque les contraintes de niveau supérieur sont appliquées pour obtenir une durée d'essai plus courte

Note 1 à l'article: Pour qu'un essai soit effectivement accéléré, le facteur d'accélération est >1 .

Note 2 à l'article: Lorsqu'on suppose une loi de distribution de Poisson avec un taux de défaillance constant, le facteur d'accélération correspond au rapport entre le temps sous contrainte en utilisation et le temps sous contrainte aggravée au cours de l'essai.

3.1.4

essai aux limites hautement accéléré

HALT

essai destiné à identifier les modes de défaillance les plus probables pour le produit dans un environnement de contrainte ou une séquence d'essais définis

Note 1 à l'article: L'acronyme HALT est quelquefois considéré comme étant l'abréviation de "highly accelerated life test" (sa désignation erronée) qui signifie essai de durée de vie hautement accéléré. Cependant, en tant qu'essai accéléré non mesurable, il ne fournit pas d'informations concernant la durée de vie, mais sur l'amplitude des contraintes qui représentent les limites de la conception.

3.1.5

essai sous contraintes hautement accéléré

HAST

essai dans lequel les contraintes appliquées sont considérablement accrues dans le but de réduire la durée de leur application

3.1.6

déverminage sous contraintes hautement accéléré

HASS

déverminage destiné à identifier les défauts latents d'un produit dus au processus de fabrication ou à des erreurs du contrôle

3.1.7

audit sous contraintes hautement accéléré

HASA

outil de surveillance du processus permettant de soumettre aux essais un échantillon de lots de production afin de détecter les faiblesses d'un produit, dues à la fabrication

3.1.8

énergie d'activation

E_a

facteur empirique d'estimation de l'accélération, due à une modification de la température absolue

Note 1 à l'article: L'énergie d'activation est en général mesurée en électronvolts par degrés Kelvin.

3.1.9

compression d'événements

augmentation de la fréquence de répétition des contraintes afin qu'elles soient beaucoup plus élevées que celles rencontrées sur le terrain

3.1.10**compression temporelle**

retrait de la durée d'exposition d'un essai donné, à des niveaux de contrainte faibles ou considérés non dommageables à des fins d'accélération

3.1.11**déverminage de précipitation**

profil de déverminage destiné à précipiter, par des défaillances, la transformation de défauts latents en défauts permanents

3.1.12**déverminage de détection**

exposition à de faibles niveaux de contrainte afin de détecter des défauts intermittents

3.2 Symboles et abréviations

Symbole/ abréviation	Terme	Equivalent en anglais
$R(t)$	fiabilité en fonction du temps; probabilité de survie jusqu'à l'instant t	reliability as a function of time; probability of survival past the time t
NOTE 1 CEI 60050-191:1990, définition 191-12-01 utilise le symbole $R(t_1, t_2)$ générique. Le temps peut être remplacé par des cycles, des mesures de distance, etc.		
$\lambda(t)$	taux de défaillance en fonction du temps	failure rate as a function of time
NOTE 2 En matière d'essais de croissance de fiabilité, le même symbole généralement utilisé pour le taux de défaillance instantanée peut être utilisé pour l'intensité des défaillances variables		
HALT	essai aux limites hautement accéléré	highly accelerated limit test
HASS	essai de déverminage sous contraintes hautement accéléré	highly accelerated stress screening test)
HAST	essai sous contraintes hautement accéléré	highly accelerated stress test
HASA	audit sous contraintes hautement accéléré	highly accelerated stress audit
$\lambda(S)$	taux de défaillance en fonction d'une contrainte donnée	failure rate as a function of a stres
UUT	unité en essai	unit under test
A	accélération, facteur d'accélération	acceleration, acceleration factor
A_{essai}	accélération globale au cours d'un essai donné	overall acceleration in a test
ADT	essais de dégradation accélérés	accelerated degradation testing
DSL	niveau de spécification de conception	design specification limit
RTL	niveau d'essai de fiabilité	reliability test level
SL	limite de spécification	specification limit
DL	limite de destruction	destruct limit
LDL	limite inférieure de destruction	lower destruct limit
UDL	limite supérieure de destruction	upper destruct limit
OL	limite de fonctionnement	operating limit
UOL	limite supérieure de fonctionnement	upper operating limit
LOL	limite inférieure de fonctionnement	lower operating limit
SPRT	essai de taux de probabilité progressif	sequential probability ratio test
RG	croissance de la fiabilité	reliability growth
URL	limite supérieure des essais de fiabilité	upper reliability test limit
LRTL	limite inférieure des essais de fiabilité	lower reliability test limit

Symbole/ abréviation	Terme	Equivalent en anglais
THB	essai de différentiel température/ humidité	temperature humidity bias test
TTF	durée de fonctionnement avant défaillance	time to failure
MTBF	temps moyen de fonctionnement entre défaillances	mean operating time between failures
MTTF	temps moyen avant défaillance	mean time to failure
AF	facteur d'accélération	acceleration factor
FIT	taux de défaillance	failure to time
CALT	essai de durée de vie accéléré étalonné	calibrated accelerated life testing
ADL	essai de dégradation accéléré	accelerated degradation test
t_0	début d'une période de détermination de la durée de vie avant limite de destruction d'un produit	start of a period of in determination of product destruct life rest
t_L	durée d'un moment prédéterminé, par exemple durée de vie	duration of a predetermined time, e. g. life

4 Description générale des méthodes d'essai accéléré

4.1 Modèle de cumul des dommages

Quels que soient les types d'essais accélérés, ils sont fondés sur le principe des dommages cumulés. Les contraintes que subit le produit au cours de sa durée de vie entraînent des dommages progressifs qui s'accumulent pendant toute sa durée de vie. Ces dommages peuvent ou non entraîner des défaillances du produit sur le terrain.

La stratégie utilisée pour tout type d'essai accéléré est de produire, en augmentant les niveaux de contrainte imposés au cours des essais, des dommages cumulés équivalents à ceux prévus au cours de la durée de vie du produit pour le type de contrainte escompté. La détermination des limites de destruction du produit, sans estimation de la fiabilité, fournit des informations quant à l'existence éventuelle d'une marge suffisante entre ces limites de destruction et les limites de spécification du produit qui permettent ainsi de s'assurer que le produit restera fonctionnel pendant sa durée de vie prédéterminée sans défaillances pour ce qui concerne ce type de contrainte spécifique. Cette technique ne quantifie pas nécessairement la probabilité de survie du produit au cours de sa durée de vie prévue mais permet de s'assurer que les réajustements nécessaires apportés à la robustesse du produit permettraient d'éliminer cette défaillance lorsque le produit est utilisé. Si des marges suffisantes sont déterminées, non liées à la probabilité de survie, alors l'essai est de type qualitatif. Si, au cours des essais, la probabilité de survie est évaluée, l'amplitude de la contrainte d'essai est corrélée à la probabilité de survie du produit à ce type de contrainte au cours de sa période de vie prédéterminée et l'essai est de type quantitatif.

La Figure 1 présente le principe des dommages cumulés pour des essais accélérés tant qualitatifs que quantitatifs.

Dans la Figure 1, pour plus de simplicité, toutes les contraintes, les limites de fonctionnement, les limites de destruction, etc., sont données en valeurs absolues. Les valeurs extrêmes, supérieure et inférieure, de la spécification sont fournies pour une entité donnée, c'est-à-dire les limites de spécification supérieure et inférieure (ou basse), USL et LSL, ainsi que les limites de conception correspondantes, UDL et LDL, les limites supérieure et inférieure de fonctionnement, UOL et LOL, ainsi que les limites supérieure et inférieure des essais de fiabilité, URTL et LRTL. Ceci est justifié par le fait que les contraintes opposées négatives peuvent également causer des dommages cumulés avec probablement un mécanisme de défaillance différent et ainsi la relation entre les limites prévues et spécifiées peut être représentée de la même manière que pour des contraintes élevées ou positives. A

titre d'exemple, des extrêmes de température froide peuvent produire des modes de défaillance identiques ou différents dans un produit. Pour des raisons de simplification, les valeurs thermiques positives et négatives ou toute autre contrainte ne sont pas présentées de manière séparée sur la Figure 1, ainsi les amplitudes des contraintes sont soit positives soit négatives et présentées en valeurs absolues uniquement pour les limites supérieures ou inférieures.

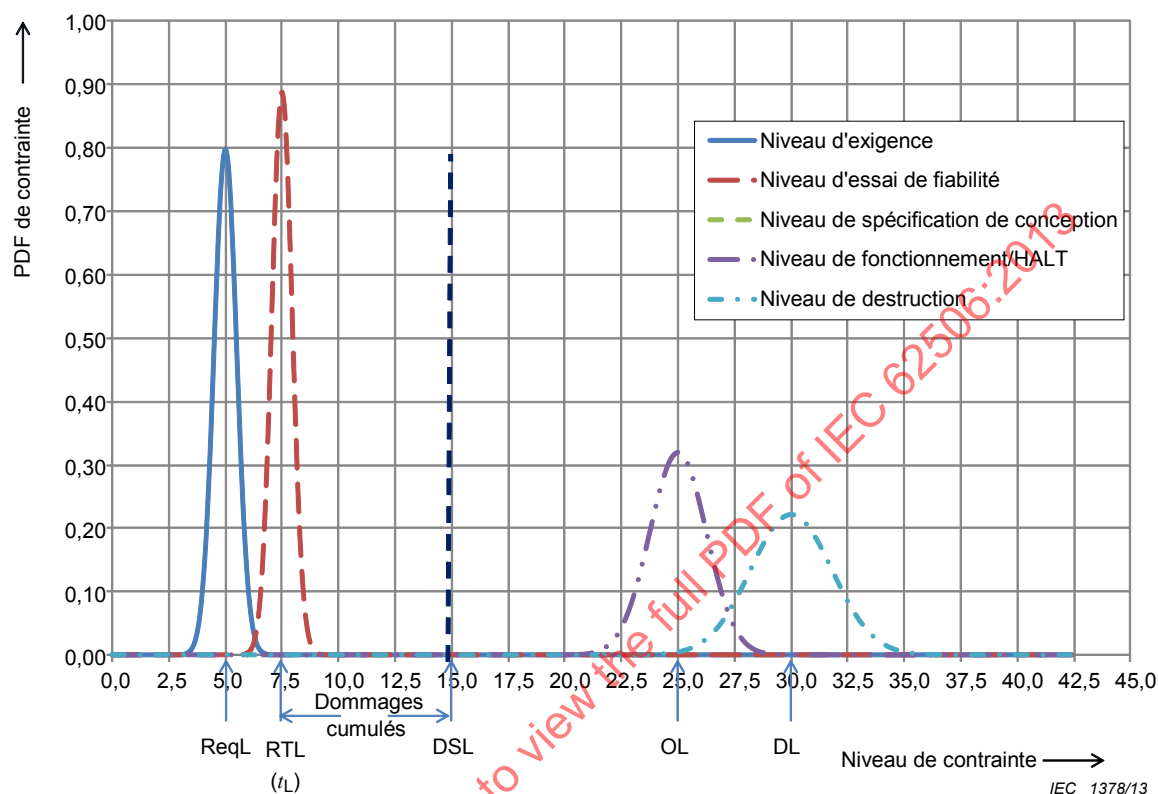


Figure 1 – Fonctions de densité de probabilité (PDF – probability density function) pour dommages cumulés, dégradation et types d'essais

Le graphique de la Figure 1 représente la robustesse requise d'un produit vis-à-vis d'une contrainte donnée, pour l'ensemble de sa durée de vie, du début de vie (par exemple, au moment de la fabrication du produit) t_0 à la fin de vie t_L . On suppose également que la robustesse et les contraintes d'essai ont une distribution gaussienne.

Les différents types d'essais accélérés peuvent désormais être illustrés en utilisant la Figure 1 comme modèle conceptuel.

Les essais fonctionnels sont réalisés dans l'étendue de la spécification des exigences et le niveau de la spécification. Il convient qu'il n'y ait dans ce domaine aucune défaillance au cours de l'essai; la conception est validée de manière à permettre le fonctionnement dans les limites supérieure et inférieure de spécification. Les essais accélérés de Types B et C (4.2.3 et 4.2.4), c'est-à-dire les essais de dégradation accélérés (ADT) ou les essais de dommages cumulés peuvent être illustrés comme étant la distance entre le niveau de spécification de conception (DSL) et le niveau auquel il convient d'effectuer l'essai de démonstration de la fiabilité (RTL). Lorsque la dégradation réduit les performances au-dessous des spécifications des exigences, le produit peut être déclaré comme défaillant si ce comportement est défini comme une défaillance. Lorsque les essais du produit sont effectués à l'instant t_0 , il convient qu'aucune défaillance n'apparaisse pour des niveaux de contrainte allant jusqu'au niveau de spécification de conception (DSL) compris.

Il convient que la spécification de conception du produit tienne compte d'une certaine dégradation au cours de sa durée de vie, qui résulte des dommages cumulés des contraintes

prévues pendant sa durée de vie; ainsi sa limite est la limite de spécification de conception (DSL) qui est supérieure à la limite exigée (RL) pour obtenir la marge nécessaire. Après la dégradation résultant des dommages cumulés dus aux contraintes prévues, l'essai de fiabilité fournit des informations sur l'existence d'une marge entre le niveau d'essai (qui prouve la robustesse résiduelle) et l'exigence. Cette marge est une mesure de la fiabilité à la fin de la période requise, t_L .

La résistance ultime de la conception est beaucoup plus élevée que les spécifications de conception; il s'agit du niveau sélectionné pour les essais accélérés qualitatifs lorsque l'objectif est la détermination des faiblesses de conception qui pourraient compromettre la fiabilité du produit au cours de sa durée de vie – c'est-à-dire les faiblesses qui pourraient apparaître au cours de la durée de vie du produit au fur et à mesure de sa dégradation. Ainsi, au cours de l'essai qualitatif, la robustesse est démontrée à la limite de fonctionnement (OL).

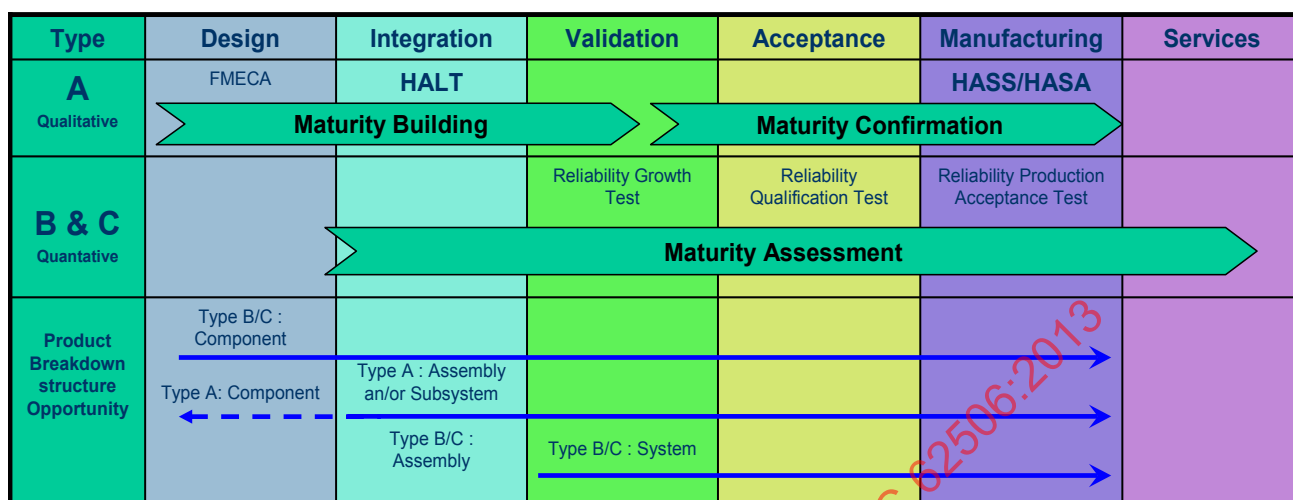
La limite de destruction (DL) est supérieure (au-delà) à la limite de fonctionnement, lorsqu'on observe une défaillance permanente. Si OL ou DL est proche de DSL ou si l'écart-type de la loi de distribution de OL ou DL est élevé, l'essai indique alors une faiblesse potentielle de la conception, comme le montre la Figure 1.

La fiabilité du produit est définie par une fonction du temps, sur une période prédéterminée, t_L .

La loi normale cumulée de la marge (différence des moyennes des contraintes divisée par leur écart-type commun) entre la robustesse spécifiée (dans des conditions d'utilisation) qui est représentée par l'exigence et le niveau d'essai de fiabilité (RTL), détermine la fiabilité du produit. Le niveau d'essai et sa durée sont choisis de manière à engendrer au cours de l'essai des dommages cumulés correspondant à la dégradation due aux dommages cumulés pendant la durée de vie du produit. La marge calculée donne la fiabilité requise du produit, qui est dans ce cas une mesure quantitative.

Le Tableau 1 présente un résumé des essais énumérés et la mise en correspondance de leurs applications avec le cycle de vie du produit.

Tableau 1 – Mise en correspondance des types d'essais avec le cycle de développement du produit



IEC 1379/13

Légende

Anglais	Français
Design	Conception
Integration	Intégration
Acceptance	Acceptation
Manufacturing	Fabrication
Qualitative	Qualitatif
FMECA	AMDEC
Maturity building	Elaboration de maturité
Maturity confirmation	Confirmation de la maturité
Quantitative	Quantitatif
Reliability growth test	Essai de croissance de la fiabilité
Reliability qualification test	Essai de qualification de la fiabilité
Reliability production acceptance test	Essai d'acceptation en production de la fiabilité
Maturity assessment	Evaluation de la maturité
Product breakdown structure opportunity	Possibilité de panne structurelle du produit
Component	Composant
Assembly an/or subsystem	Ensemble et/ou sous-système
Assembly	Ensemble
System	Système

Le Tableau 1 fournit aux utilisateurs de la présente norme une synthèse leur permettant de mieux comprendre les différentes méthodes à considérer et le moment de leur application pendant tout le cycle de vie du produit.

4.2 Classification, méthodes et types d'accélération d'essai

4.2.1 Généralités

En se fondant sur le modèle de cumul des dommages, les informations attendues de l'essai et les hypothèses d'utilisation du produit, les méthodes d'essais accélérés peuvent être divisées en trois groupes:

- Type A: essais accélérés qualitatifs: pour la détection du mode de défaillance et/ou du phénomène;
- Type B: essais accélérés quantitatifs: pour la prévision de la distribution des défaillances en utilisation normale;
- Type C: essais quantitatifs de compression temporelle et d'événements: pour la prévision de la distribution des défaillances en utilisation normale.

NOTE Les types d'essais B et C peuvent donner lieu à une réduction de la durée de l'essai. Il convient de réaliser l'essai de type B en fonction du mécanisme de défaillance particulier considéré, il peut généralement être appliqué pour l'accélération de la durée de vie. L'essai de type C nécessite de supposer des conditions d'utilisation ou des conditions spécifiques avant de réaliser l'essai. L'essai de type C peut être appliqué à l'accélération du taux de défaillance.

4.2.2 Type A, essais accélérés qualitatifs

Les essais accélérés de Type A sont conçus pour identifier les éventuelles faiblesses de conception, ainsi qu'une faiblesse due au processus de fabrication. Par conséquent, leur illustration sur la Figure 1 peut être considérablement plus élevée, au-dessus de OL. L'objectif de ce type d'essai n'est pas de quantifier la fiabilité du produit, mais d'induire ou de précipiter l'apparition, au cours de l'essai, des problèmes de performance globale du produit qui risquent d'apparaître en utilisation sur le terrain, à un certain moment au cours de la durée de vie utile du produit, et d'entraîner une défaillance du produit. L'amélioration de la conception du produit ou des processus de fabrication permet d'éliminer ces défaillances en élaborant un produit plus résistant ou plus robuste qui est censé être plus fiable sur le terrain, même lorsqu'il est soumis aux contraintes extrêmes ou répétitives définies dans les spécifications de conception.

Les processus de développement du produit qui utilisent ce type d'essai augmentent la fiabilité du produit en réduisant les modes de défaillance et en augmentant la robustesse du produit sans chercher à démontrer un objectif de fiabilité ou à mesurer une amélioration de la fiabilité. Ces essais sont souvent réalisés à des niveaux de contrainte tellement élevés qu'il convient de pouvoir idéalement observer les défaillances ((DL), en Figure 1), bien au-delà des limites de la spécification de conception. L'objectif est d'identifier les modes de défaillance, les maillons faibles de la conception et la marge entre limites fonctionnelles, la limite de fonctionnement (OL) et la limite de destruction (DL), comme illustré en Figure 1. La marge entre la limite de spécification et la limite de fonctionnement permet de s'assurer que les faiblesses ont été identifiées au cours d'essais HALT et qu'elles n'apparaîtront pas comme des défaillances au cours de la durée de vie prévue du produit, t_L .

4.2.3 Type B: essais accélérés quantitatifs

Les essais de type B utilisent des méthodes d'étude des dommages cumulés pour déterminer la fiabilité du produit estimée jusqu'à la fin de la durée de vie prévue du produit. La marge nécessaire entre les dommages cumulés prévus et l'exigence donne une mesure de la fiabilité. Ces essais sont ainsi accélérés pour obtenir les dommages cumulés requis en des périodes beaucoup plus courtes que la durée de vie prévue du produit. Les essais accélérés de type B utilisent les facteurs d'accélération quantifiables fondés sur les caractéristiques physiques des défaillances (ou modes de défaillance) particulières et établissent un rapport entre la durée d'exposition aux contraintes spécifiques pendant l'essai et dans l'environnement d'utilisation. La distribution des défaillances ou des modes de défaillance est déterminée à partir d'informations recueillies lors d'essais accélérés séparés. Ces résultats d'essais constituent la base d'un modèle de cycle de vie fonctionnel et peuvent être utilisés pour quantifier l'accélération d'essais utilisables si nécessaire et/ou le cas échéant, pour divers calculs de fiabilité. Il est possible de cette manière d'estimer la fiabilité du produit par estimation de la fiabilité ou de la probabilité d'occurrence de modes de défaillance individuels pour chaque niveau des contraintes prévues. Si cela est nécessaire pour l'analyse des données à partir d'autres types d'essais (par exemple des essais de croissance de la fiabilité ou de démonstration de la fiabilité), le facteur établi d'accélération d'essai peut être utilisé pour recalculer les données de durée de fonctionnement avant défaillance à partir des essais accélérés, de manière à représenter les durées avant occurrence de défaillances dans

l'environnement d'utilisation et d'appliquer ces résultats aux calculs de fiabilité. Dans la Figure 1, ces essais sont représentés comme des niveaux d'essais de fiabilité (RTL).

Une autre manière d'obtenir des informations à partir de ce type d'essai est de soumettre aux essais des échantillons d'entités pour des modes de défaillance spécifiques et pour des environnements de défaillance spécifiques. Ceci permet de déterminer les lois de distribution des défaillances applicables et les facteurs d'accélération appropriés, qui peuvent ensuite être utilisés pour calculer la probabilité d'occurrence du mode de défaillance particulier. Ces informations peuvent être utilisées pour des essais futurs, ainsi que pour des essais Weibayes (Weibull avec 1 paramètre donné; voir la CEI 61649). Le niveau de contrainte des essais de Type B peut être illustré en Figure 1 comme étant supérieur à l'exigence, mais inférieur au niveau de contrainte qui serait appliqué lors d'essais HALT. Ce niveau de contrainte peut se trouver entre la limite de spécification de conception et le niveau de contrainte de DL. La durée d'application des contraintes doit être suffisante pour engendrer une marge de dommages cumulés au-delà des dommages cumulés produits par les contraintes prévues au cours de la durée de vie du produit. Cette marge permet ensuite d'obtenir la mesure de la fiabilité du produit au cours de la période t_L , $R(t_L)$.

La réduction de la durée d'essai est en général obtenue par une augmentation de la contrainte opérationnelle ou environnementale au-delà des contraintes spécifiées en utilisation. L'augmentation de niveau de ces contraintes produit un effet de dommages cumulés équivalent à ceux qui sont prévus au cours de la durée de vie du produit, mais sur une période considérablement réduite.

L'essai de dégradation accéléré (ADT) applique une méthode pour laquelle la dégradation d'une entité est mesurée en fonction du temps ou des cycles de contrainte. La dégradation est tracée et extrapolée jusqu'à ce que le paramètre atteigne un niveau inacceptable (défaillance). Cette méthode est très utile pour les défaillances qui ne se produisent pas de manière soudaine mais se développent progressivement. Les niveaux de contrainte appliqués au cours de l'essai peuvent correspondre aux limites de fonctionnement nominal ou le plus défavorable prévues en utilisation sur le terrain ou l'essai peut être accéléré en augmentant les contraintes d'essai comme décrit dans la présente norme [7].

4.2.4 Type C: essais quantitatifs de compression temporelle et d'événements

4.2.4.1 Utilisation des essais de Type C

Les essais de Type C sont le plus souvent utilisés pour estimer la durée de vie des composants lorsque le mode de défaillance dominant est l'usure en utilisation quotidienne, tels les commutateurs, les claviers, les relais, les connecteurs ou les paliers. Les données obtenues à partir de ces essais sont souvent analysées en utilisant la loi de Weibull, et sous la forme de ce que l'on appelle des "essais de mort subite" (voir la CEI 61649).

De même, les essais de compression temporelle de type C sont souvent utilisés pour identifier:

- les problèmes d'intégration système (comme, par exemple, l'intégration ou l'interaction entre logiciel et matériel);
- les modes de défaillance spécifiques à l'état de fonctionnement, par exemple les cycles de fonctionnement de tout événement comportant un cycle mécanique et électrique;
- les modes de défaillance spécifiques à des environnements comportant de larges domaines de contrainte, mais pour lesquels il est défini un seuil tel que les expositions à des contraintes inférieures à ce seuil n'auront pas de contribution significative à l'endommagement du produit.

Les compressions temporelles ou les compressions d'événements permettent d'accélérer les contraintes en durée ou en fréquence d'application sans augmentation de leur niveau.

Une description approfondie de chacune des méthodes d'essais accélérés ci-dessus est fournie à l'Article 5.

4.2.4.2 Compression temporelle

La compression temporelle est une accélération d'essai qui peut être appliquée dans certaines circonstances, lorsque les essais tiennent compte uniquement de la durée pendant laquelle un produit est réellement fonctionnel ou fonctionne dans un état qui génère des dommages significatifs (également appelée élimination des "expositions non dommageables"). Ce type d'accélération peut être appliqué dans des circonstances où les contraintes opérationnelles et leurs dommages cumulés sont notablement plus élevés que ceux qui apparaissent dans d'autres modes opérationnels, comme par exemple dans un état non opérationnel ou de veille, etc. Pour appliquer cette méthode, il convient que les dommages cumulés au cours de périodes de moindres contraintes soient insignifiants par rapport aux dommages cumulés au cours des périodes de contraintes élevées qui, physiquement, ne peuvent pas être facilement justifiées (voir la CEI 60605-2).

4.2.4.3 Compression d'événements

Lorsqu'une contrainte est répétitive, comme, par exemple, un cycle de MARCHE/ARRET, l'essai peut être accéléré par une répétition rapide des contraintes (compression d'événements). Ceci est notamment utile dans le cas où le niveau de contrainte proprement dit ne peut pas être accéléré. De cette manière, le nombre d'opérations demeure le même et c'est le cas également de l'effet des dommages cumulés. Il convient de s'assurer que le niveau de répétition plus élevé des contraintes ne génère pas de modes de défaillance qui n'apparaîtraient pas en fonctionnement normal, comme, par exemple, l'auto-échauffement d'une pièce en plastique, des vibrations non amorties avant la charge suivante et des séquences logicielles qui ne se terminent pas avant le signal suivant.

5 Modèles d'essais accélérés

5.1 Type A: essais accélérés qualitatifs

5.1.1 Essais aux limites hautement accélérés (HALT)

5.1.1.1 Généralités

La présente norme présente chaque type de méthodes d'essais accélérés couramment utilisées en décrivant ses avantages et inconvénients perçus ainsi que les précautions d'application nécessaires.

L'essai de type A ne représente pas uniquement l'essai HALT classique mais il traduit également d'autres types d'essais hautement accélérés tels que les essais en autoclave, les essais de chocs thermiques et autres essais accélérés quantitatifs.

Le modèle illustré en Figure 1 présente le rapport entre les spécifications, les limites de conception et les stratégies d'essai de la méthode HALT.

NOTE L'acronyme HALT a malencontreusement été considéré comme signifiant «Highly Accelerated Life Test» (Essai de durée de vie hautement accéléré). Cependant, étant par nature un essai accéléré qualitatif, HALT ne mesure pas la durée de vie d'une entité, même si l'expression "durée de vie" est induite par le fait que les défaillances obtenues lors des essais HALT ne seraient pas rencontrées au cours de la durée de vie de l'entité soumise à l'essai. L'essai vérifie effectivement les limites de robustesse d'un produit/entité et ainsi le terme «limite» semble bien approprié.

Lorsque la démonstration de la fiabilité ou les essais de croissance de la fiabilité sont accélérés, il est nécessaire de démontrer l'existence d'une marge entre les dommages cumulés induits par les contraintes appliquées lors de l'essai et les dommages cumulés dus aux contraintes prévues au cours de la durée de vie de l'entité ou à tout autre moment prédéterminé pour lequel la fiabilité est à démontrer. Les résultats d'essai favorables pour les marges appliquées donnent des informations sur la fiabilité du produit audit moment.

prédéterminé, exprimées par des critères de robustesse en fonction de la contrainte. Les résultats d'essai prouvent la robustesse démontrée tandis que la fiabilité est le complément de la zone commune aux deux courbes, de charge et de robustesse, présentées en Figure 2 (cette zone commune représente la probabilité de défaillance).

Dans la Figure 1, les spécifications des exigences sont traduites en spécifications de conception. La figure illustre en outre la manière dont la marge de conception est vérifiée par les essais HALT.

Pour estimer la marge entre les spécifications de conception et l'unité en essai (UUT), il est nécessaire d'augmenter les niveaux de contrainte jusqu'à apparition des défaillances en utilisant des essais de Type A. Les marges vérifiées au cours de ces essais HALT sont illustrées par une limite de contrainte de fonctionnement (OL), ainsi que par une limite de destruction (DL). Ceci indique également les marges de variations des matériaux et des processus de fabrication, en cours de fabrication.

5.1.1.2 Principes fondamentaux des essais HALT

La méthodologie de HALT est de précipiter rapidement des défaillances afin d'identifier et de pallier les faiblesses de conception d'un produit, de manière à en augmenter la robustesse en utilisation opérationnelle. Ce type d'essai accéléré n'est pas destiné à mesurer mais à augmenter la fiabilité du produit en éliminant les modes de défaillance ayant la marge la plus faible entre contrainte opérationnelle (charge) et robustesse du produit (Figures 2 et 3). Ce type d'essai accéléré identifie uniquement les modes de défaillance potentiels et permet d'orienter le développement et l'amélioration des processus pour les agents d'agression choisis. L'expérience tirée des essais HALT est telle que la plupart des produits sont très robustes pour les contraintes appliquées, même si quelques composants ou détails de conception sont notablement plus faibles que le reste. L'idée sous-jacente d'un essai HALT est de trouver ces quelques composants ou détails de conception et de les rendre aussi robustes que le reste du produit.

La Figure 2 illustre l'interaction entre distribution de la robustesse et des contraintes. On suppose que les contraintes sur le terrain dues à diverses applications, conditions climatiques, etc. peuvent être modélisées par une distribution des contraintes. Ces contraintes sont ici présentées en distribution normale. La robustesse du produit variera en fonction des différences de matières premières et de processus de fabrication. Le modèle de robustesse correspondant est également présenté en Figure 2 comme une distribution normale.

La zone commune aux distributions des contraintes et de la robustesse mesure la probabilité de défaillance du produit. Le graphique de la Figure 2 présente la marge de conception classique, les critères de robustesse en fonction des contraintes, mais dans le contexte du présent article, il ne tient pas compte du modèle de cumul des dommages et, par conséquent, il n'est pas applicable à l'essai initial de courte durée qui permettrait de mesurer la résistance ultime de la conception du produit. De même, si un contrôle qualité poussé du produit maintient une très étroite distribution de la robustesse (ce qui peut être une mesure très onéreuse et chronophage), il n'y aurait pas chevauchement des distributions, ce qui signifie que pour le mode de défaillance spécifique, les défaillances sur le terrain seraient peu probables.

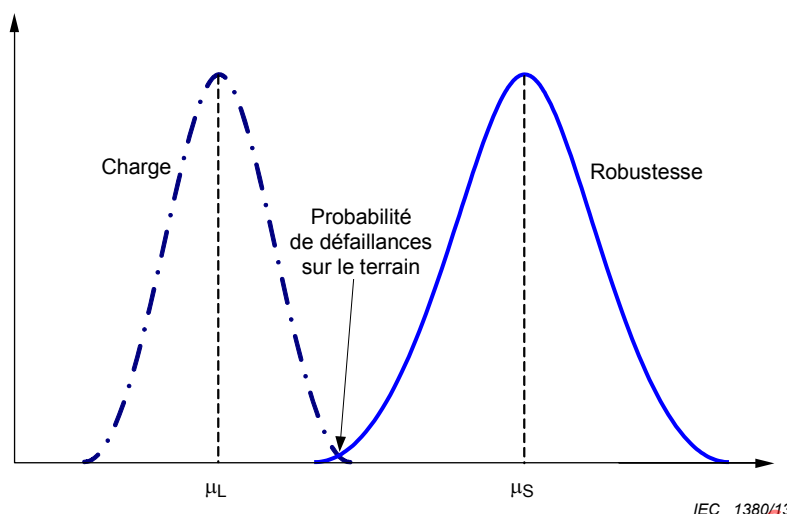


Figure 2 – Relations de PDF de la robustesse du produit en fonction de la charge en cours d'utilisation

Lorsqu'il s'agit de produire les unités d'essai initiales, le processus de fabrication est en général maintenu sous contrôle strict, ce qui n'est pas toujours le cas lors des cycles de production continus ultérieurs. La Figure 3 montre que les échantillons fabriqués pour les essais sont souvent de robustesse moyenne ou plus, sachant qu'ils sont souvent fabriqués sur une chaîne spéciale pour prototypes et qu'ils bénéficient d'une attention maximale de l'encadrement. Lorsque le produit est fabriqué en série, les entités de production ordinaires auront une caractéristique de distribution plus large que celle obtenue pour la production initiale des unités destinées aux essais. Ceci est illustré en Figure 3. Si la distribution des premiers échantillons produits avec un maximum de soin était tracée en fonction de la contrainte, le côté inférieur de la courbe de distribution se situerait à l'emplacement du niveau moyen H1 de la nouvelle distribution.

Cette distribution initiale est étroite lorsqu'elle s'écarte de la distribution de la charge prévue présentée comme étant la distribution du côté gauche. Toutes les entités de la production considérée auraient passé l'essai avec succès, ce qui signifie qu'aucune défaillance n'aurait été détectée. Cependant, lors de la production en série ultérieure, la distribution de la robustesse devient beaucoup plus large, de sorte que le chevauchement devient imminent; ceci conduit à la défaillance des unités de production plus faibles soumises à la charge opérationnelle. Ceci signifie que l'essai ne serait pas capable de déceler de manière appropriée la faiblesse potentielle des unités produites en série. Si le niveau d'essai est plus élevé (moyenne se situant approximativement au niveau H3 sur la Figure 3) et si la distribution de la robustesse du produit inclut la production normale, un tel essai fournirait une marge suffisante pour garantir la détection et la réduction des défaillances potentielles en utilisation des unités les plus faibles. Si la distribution ne dispose pas d'une marge appropriée, la production ultérieure donnera lieu à des défaillances sur le terrain.

Il s'agit là de la justification des essais sous contrainte échelonnée et des essais HALT qui garantissent une marge appropriée par rapport aux contraintes prévues au cours de la durée de vie du produit. De cette manière, il est possible de réaliser ces essais sur un nombre beaucoup plus faible d'échantillons d'essai que celui qui est nécessaire pour des essais classiques.

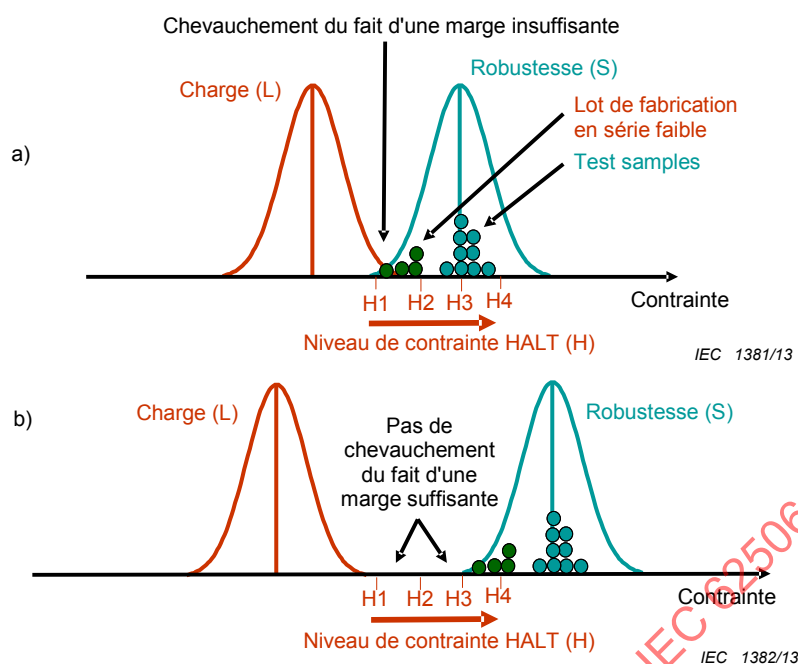


Figure 3 – Manière dont l'incertitude de la charge et de la robustesse affecte la politique d'essai

HALT est un essai exploratoire et qualitatif d'amélioration de la conception et il convient donc de l'accepter en tant que tel. Il identifie le mode de défaillance du maillon le plus faible de la conception pour le ou les types de contrainte(s) concernés. Si le mode de défaillance est lié aux contraintes rencontrées dans l'environnement d'utilisation du produit, les niveaux de contrainte ne peuvent être estimés que par un jugement technique qui tient compte de la marge entre les courbes de charge et de robustesse et qui inclut la marge supplémentaire induite par les variations attendues du processus de fabrication et de l'environnement d'utilisation prévu. Le Tableau C.1 illustre la comparaison entre les essais HALT et un essai accéléré classique.

Sachant que le maillon le plus faible cédera en premier, l'application de HALT se poursuit afin de détecter le deuxième, le troisième et les autres maillons faibles suivants. Cette procédure se poursuit jusqu'à ce qu'aucun mode de défaillance pertinent ne soit observé ou jusqu'à ce que soient atteintes les limites technologiques du système soumis à l'essai.

HALT est conçu pour aller au-delà de l'environnement d'utilisation du produit et de ses spécifications de conception. Les contraintes sont appliquées pendant de courtes durées et l'objectif est de précipiter les défaillances latentes et de renforcer le produit dans toute la mesure où cela est économiquement et techniquement réalisable. HALT identifie les modes de défaillance, mais non leur dépendance temporelle.

L'unité en essai (UUT) est à surveiller du point de vue fonctionnel au cours de l'essai, afin de détecter les éventuelles pertes de fonctions. S'il n'est pas possible d'assurer une surveillance continue, le produit est à soumettre aux essais en maintenant constant le niveau de contrainte. L'Annexe A illustre une procédure-type d'essai HALT.

L'amplitude des contraintes n'est pas l'élément d'intérêt principal de HALT; le véritable centre d'intérêt d'un programme HALT efficace est l'amélioration du produit et la réponse devant être apportée par l'organisme aux défaillances. Il convient que l'amélioration du produit se poursuive jusqu'à obtenir un produit robuste et rentable dont aucune partie de la conception n'est notablement plus faible que le reste du produit. L'objectif est de continuer à améliorer le produit jusqu'à un niveau justifié par l'analyse de rentabilisation et l'utilisation d'une technologie efficiente.

Les limites de fonctionnement et de destruction du produit peuvent être représentées comme des distributions sur un axe des contraintes, comme illustré en Figure 4, pour les deux limites, supérieures et inférieures (LOL, UOL, LDL et UDL).

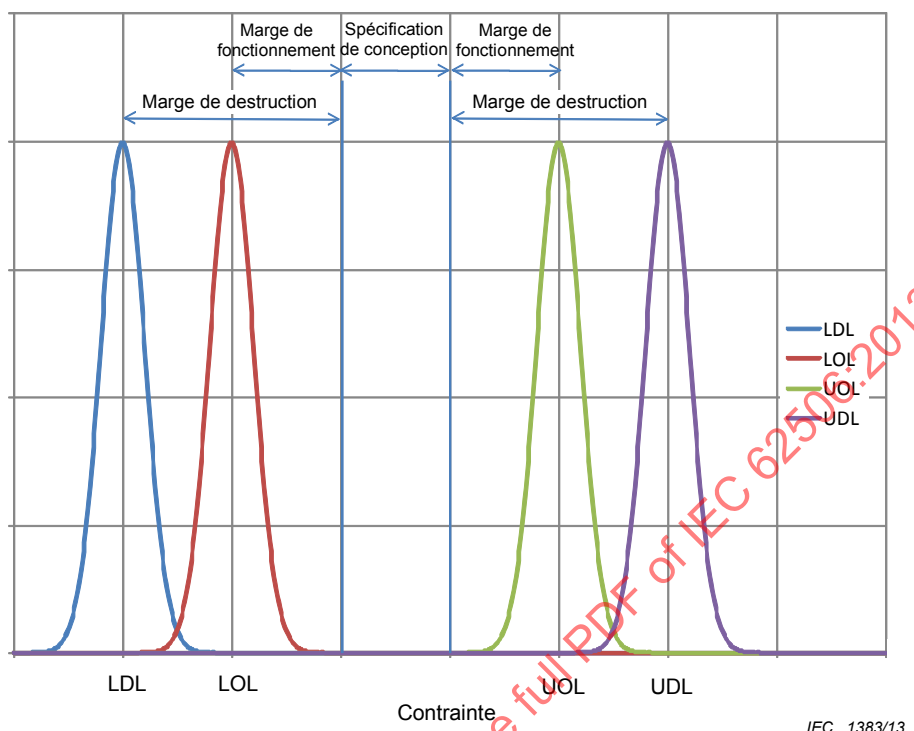


Figure 4 – PDF des limites de fonctionnement et de destruction en fonction de la contrainte appliquée

Dans l'exemple de la Figure 4, les deux limites de contrainte affectent une entité donnée. Cet exemple pourrait être la contrainte thermique; dans ce cas, les performances du produit sont affectées tant par les basses que par les hautes températures. Ces effets peuvent ne pas être symétriques, étant donné que les limites de haute et basse températures peuvent se situer à une distance différente par rapport à la contrainte de conception nominale. Même si ces essais sont réalisés sur des prototypes à un stade de production précoce, ils peuvent fournir des informations sur les modes de défaillance liés à la conception. La Figure 4 montre que toutes ces limites peuvent varier comme l'indiquent les lois de distribution. Ces lois de distribution peuvent avoir des écarts-types différents et la détermination de HALT donne une indication des marges qui permettent au produit final de subir ces variations sans défaillances sur le terrain.

Bien que la Figure 4 décrive une contrainte thermique, la méthode HALT peut également être appliquée avec succès à d'autres types de contraintes. Dans le cas d'autres types de contraintes, il est possible qu'il n'y ait pas de limites inférieures comme par exemple dans le cas de contraintes mécaniques, mais il peut y avoir d'autres contraintes telles que des contraintes électriques ou même l'humidité.

5.1.1.3 Types de contraintes et application

Les contraintes principalement ou généralement appliquées dans les essais HALT sont les suivantes:

- température;
- cycle thermique;
- vibrations/chocs;

- tension électrique;
- combinaison de vibrations/chocs et cycle thermique.

D'autres contraintes spécifiques au produit peuvent également être appliquées telles que la fréquence d'horloge pour les microprocesseurs, les variations de tension ou de puissance, l'exposition à des contaminants ou à des solvants, etc. ou une combinaison de ces contraintes.

La vérification des marges et les améliorations apportées au produit en réponse aux essais HALT permettent d'augmenter la probabilité de robustesse et de fiabilité du produit sur le terrain.

L'Annexe A donne un exemple de niveaux de contrainte-types. Les contraintes d'essai HALT sont également appliquées comme décrit au 5.1.1.2 jusqu'à ce que les contraintes maximales préétablies soient atteintes. Ces contraintes maximales sont déterminées comme suit:

- par les limites des matériaux et les limites technologiques des matériaux et des composants utilisés;
- par la contrainte maximale réalisable au moyen des méthodes et équipements disponibles.

A noter qu'il convient que les niveaux de contrainte appliqués ne dépassent pas les limites de résistance à la rupture du matériau au risque d'une modification des caractéristiques physiques ou chimiques.

Il est normal qu'il y ait dans l'UUT certains éléments fragiles qui ne sont pas conçus pour les niveaux de contrainte généralement appliqués au cours des essais HALT. Il convient dans toute la mesure du possible de protéger ces éléments fragiles au cours des essais HALT ou ne pas en tenir compte lors de l'évaluation des données d'essai. Les éléments fragiles peuvent être protégés en leur appliquant par exemple une source d'air de refroidissement, en les isolant contre l'air froid, en les suspendant à l'extérieur de l'UUT afin de les isoler des vibrations et des chocs ou même en les retirant de la chambre d'essai HALT et en les munissant de rallonges de raccordement au reste de l'UUT.

Il convient d'étudier chaque défaillance observée au cours des essais HALT et d'effectuer une analyse des causes profondes des défaillances. Si le mode de défaillance identifié est susceptible d'apparaître sur le terrain où il est prévu que le niveau de contrainte soit beaucoup plus faible que celui appliqué lors des essais HALT, il convient de proposer et de mettre en œuvre une mesure corrective conformément à l'état de la technique et aux décisions de la direction.

5.1.2 Essais sous contrainte hautement accélérés (HAST)

Ce type d'essai peut être considéré comme étant au croisement entre les essais qualitatifs de Type A et les essais quantitatifs de Type B. Ce type d'essai est communément utilisé dans l'industrie des composants électroniques comme une variante plus efficace (plus courte) que l'essai de différentiel température/humidité (THB) qui dure beaucoup plus longtemps, il s'agit d'un essai en autoclave d'une durée de 1 000 h. Dans le cadre des essais HAST, ces contraintes sont en général la température et l'humidité qui peuvent corroder les orifices d'interconnexion (conducteurs métalliques) des puces et les résistances à couche mince. Les composants sont généralement polarisés au cours de l'essai. Même si ces essais ne fournissent pas des estimations numériques de la fiabilité, ils sont utilisés comme des essais de requalification effectifs, qui permettent de s'assurer que la fiabilité des composants n'est pas compromise par d'éventuelles modifications apportées aux composants, voir JESD22-A110 [23]. La durée des essais HAST dans l'industrie des composants électroniques est en général d'environ 100 h et les niveaux de contrainte pour la température et l'humidité sont habituellement de 130 °C et de 85 % d'humidité relative, respectivement.

5.1.3 Déverminage/audit sous contrainte hautement accéléré (HASS/HASA)

5.1.3.1 Principe et étendue de HASS/HASA

HASS et HASA ne sont pas considérés comme des essais car il n'y a pas de critères de réussite ou d'échec. Ils sont cependant inclus dans la présente norme car ils appliquent des contraintes accélérées pour détection/déverminage des défauts. Les essais HASS sont utilisés pour déverminer des unités de production en utilisant des contraintes beaucoup plus élevées que celles prévues en utilisation normale ou lors de l'expédition du produit, mais avec des niveaux plus faibles que ceux qui pourraient réduire notablement la durée de vie du produit sur le terrain. Ces niveaux sont déterminés sur la base des conclusions et constatations du programme HALT. Le déverminage peut être effectué sur l'ensemble (100 %) des unités de production ou sur un échantillon. L'objectif du déverminage est de détecter les éventuels défauts de fabrication latents qui pourraient éventuellement apparaître lors de l'utilisation normale du produit. La détection des défauts latents, suivie par une analyse des défaillances et les actions correctives nécessaires (vérifiées par un essai conçu pour détecter le mode de défaillance spécifique), réduit le nombre de défaillances latentes. L'amélioration de la fiabilité sur le terrain qui en résulte est due à la réduction du nombre de composants mis en service présentant des défauts de fabrication latents et non à une modification de la fiabilité inhérente à la conception.

Les niveaux de contrainte utilisés en HASS/HASA permettent un déverminage de précipitation des défauts. Le déverminage de précipitation consiste à appliquer des contraintes combinées dont les niveaux s'inscrivent à peine dans les limites opérationnelles. L'objectif de ce déverminage est de précipiter la transformation de défauts de fabrication en défaillances intermittentes ou permanentes. Pour détecter les défaillances, il est recommandé de surveiller les fonctions des UUT pendant le déverminage, sachant que certaines anomalies opérationnelles peuvent ne pas être décelées lors des vérifications opérationnelles réalisées après les essais. Par ailleurs, on ne sait pas à quel moment, au cours du déverminage de précipitation, d'éventuelles défaillances fonctionnelles intermittentes peuvent être détectées. Le déverminage de précipitation peut combiner plusieurs types de contrainte et différents niveaux de contrainte. Comme pour les essais HALT, des défaillances intermittentes peuvent être vérifiées en utilisant un déverminage de détection (voir Etape 4 de A.1). Il convient d'assurer une surveillance constante afin d'obtenir une couverture fonctionnelle aussi complète que possible. Il convient d'optimiser la couverture et l'efficacité de la surveillance avant de commencer le processus de développement du déverminage. Il convient que le processus de surveillance facilite l'analyse des causes profondes.

Le déverminage de précipitation-type nécessitera de 3 min à 1 h de durée d'application des contraintes. Un supplément de temps sera nécessaire pour le montage du matériel d'essai et de surveillance.

HASS est idéalement adapté à la production pilote ou aux montées en charge de la production, c'est-à-dire à un moment où le taux de production est faible et qu'il est facile d'effectuer un déverminage à 100 %. HASS peut se poursuivre en fonctionnement normal pour des produits très critiques qui sont fabriqués en petits volumes.

HASA est un outil de surveillance du processus, utilisé lorsqu'un échantillon de lot de production est exposé au déverminage de précipitation afin de détecter les défauts possibles. HASA est souvent réalisé avant la libération du lot de production. Lorsque le processus de fabrication atteint sa maturité, HASS est souvent supplanté par HASA. HASA est par ailleurs réduit, voire écarté, lorsque l'efficacité des contrôles de production est bien établie.

5.1.3.2 Sélection des contraintes et de leurs amplitudes

Il convient de sélectionner les contraintes de manière à ne pas compromettre, du point de vue fonctionnel, les propriétés du matériau ou la durée de vie du matériel non défectueux. Les niveaux initiaux sont déterminés à partir des informations obtenues lors d'essais HALT.

Le déverminage de précipitation est réalisé à des niveaux de contrainte légèrement inférieurs aux limites de fonctionnement, sachant que les caractéristiques fonctionnelles de l'UUT sont à surveiller pendant le déverminage. En général, la contrainte de température est réduite de 5 °C et le niveau de vibration de 2 g en valeur efficace (19,62 m/s²). Avant d'utiliser le déverminage de précipitation en HASS/HASA, il convient de s'assurer qu'il ne réduit pas notablement la durée de vie du produit sur le terrain. Ceci peut être effectué, par exemple, en exposant 10 fois un échantillon donné au déverminage de précipitation.

5.1.4 Aspects techniques de HALT et de HASS

5.1.4.1 Avantages de HALT et de HASS

Les avantages de HALT et de HASS sont les suivants:

- marges de conception augmentées et vérifiées de manière sélective pour améliorer la fiabilité;
- faible effectif d'échantillons pour la détermination d'un mode de défaillance spécifique;
- détermination rapide des modes de défaillance déterminants pour des agents d'agression spécifiques et contraintes facilement combinées (la durée de l'essai est en général de 3 jours);
- analyse de compromis efficacement réalisée et détermination des actions correctives nécessaires;
- vérification rapide des actions correctives;
- déverminage efficace de la production à court terme;
- élimination des composants faibles ou défectueux (HASS) en les séparant de la population principale (amélioration de la qualité et de la fiabilité).

5.1.4.2 Inconvénients de HALT et de HASS

Les inconvénients de HALT et de HASS sont les suivants:

- a) stimulation possible des modes de défaillance qui ne seraient pas observés en utilisation normale du produit;
- b) sur-amélioration potentielle de la marge de conception (sur-conception);
- c) fiabilité résultante inconnue;
- d) confiance statistique des résultats d'essai limitée (sur ou sous-estimation des marges de conception);
- e) absence de couverture par les essais de tous les effets interactifs des modes de défaillance multiples;
- f) irréalisables pour les grands produits, les petits produits et les produits présentant des fragilités diverses;
- g) nombre limité de types de contraintes (principalement température, vibrations, chocs et cycle thermique);
- h) inaptitude à évaluer les limites de conception pour une contrainte influencée par la synergie avec d'autres types de contraintes non prévues par les types d'essais HALT.

5.2 Types B et C – Méthodes d'essais accélérés quantitatifs

5.2.1 Objectif des essais accélérés quantitatifs

L'objectif des essais accélérés quantitatifs est d'estimer une ou plusieurs mesures de fiabilité, par exemple le taux de défaillance, la probabilité de défaillance ou de survie, la durée de fonctionnement avant défaillance (TTF). L'objectif des essais accélérés quantitatifs est bien souvent la détermination de la durée de vie de composants ayant une durée de vie limitée (usure), ou la détermination (quantification) et l'amélioration de la fiabilité des

systèmes et des composants. L'analyse de Weibull est à cet effet très utile (voir la CEI 61649).

5.2.2 Fondement physique des méthodes d'essais accélérés quantitatifs de Type B

5.2.2.1 Généralités

L'objectif des essais accélérés est de mesurer la fiabilité et de vérifier les performances de fiabilité acceptables du produit sur une courte période de temps. Ainsi, l'objectif de ces essais est d'accélérer le taux de cumul des dommages pour des mécanismes pertinents de défaillance par contraintes répétitives et par usure (un mécanisme de défaillance pertinent est un mécanisme susceptible d'apparaître dans des conditions normales du cycle de vie d'un produit).

Il est nécessaire, pour accélérer les essais, d'avoir une connaissance approfondie des mécanismes de défaillance potentiels ainsi que des contraintes opérationnelles et environnementales du produit ou du système. Cette connaissance peut également être acquise par une analyse des modes de défaillance du produit conçu, associée au profil d'utilisation prévu du produit, en utilisant par exemple une analyse AMDE (voir la CEI 60812 [2]). Des mesures efficaces peuvent alors être prises, non seulement pour prévenir la manifestation de ces défaillances lorsque les produits sont soumis à des contraintes du cycle de vie ou d'utilisation prédéterminées, mais également afin de précipiter ces défaillances de manière efficace au cours des essais accélérés pour l'amélioration du produit. L'expérience a montré que les essais accélérés d'usure ou de fiabilité sont précieux pour l'évaluation de la fiabilité de systèmes électroniques, électromécaniques et mécaniques exigeant une haute fiabilité. L'application de contraintes élevées est en général destinée à :

- a) faire en sorte que la conception soit plus robuste et améliorer le processus de fabrication par des essais systématiques sous contrainte échelonnée et en augmentant les marges de contrainte grâce à des actions correctives (essais de croissance de fiabilité);
- b) réaliser des essais de durée de vie accélérés en laboratoire afin de mesurer et de vérifier la fiabilité en service.

L'étendue de l'accélération, appelée de manière générale facteur d'accélération (AF ou A) est définie comme étant le rapport de la durée de vie dans des conditions d'utilisation à la durée de vie dans les conditions d'essai accéléré. Ce facteur d'accélération est nécessaire pour pouvoir extrapoler de manière quantitative une mesure de fiabilité (telle que la durée de fonctionnement avant défaillance et les taux de défaillance) de l'environnement d'essai accéléré vers l'environnement d'utilisation, avec un certain degré de confiance raisonnable. Le facteur d'accélération dépend des paramètres matériels (par exemple, les propriétés du matériau, l'architecture du produit) de l'UUT, des conditions de contrainte en utilisation, des conditions d'essais accélérés sous contrainte et du mécanisme de défaillance applicable. Ainsi, chaque mode de défaillance pertinent (en supposant qu'il résulte d'un mécanisme de défaillance) pour l'UUT concernée dispose de son propre facteur d'accélération et les conditions d'essai (par exemple, le cycle d'utilisation, le niveau de contrainte, l'historique des contraintes, la durée des essais) doivent être adaptées en se fondant sur ce facteur d'accélération.

Les caractéristiques physiques appréhendées pour les défaillances signifient que chaque mode de défaillance est traité séparément et la marge du point de vue de la durée de vie ou de la fiabilité requise est vérifiée pour chacune de ces caractéristiques. Dans certains cas, le résultat demeure qualitatif. Cette approche est telle que chaque mode de défaillance dispose de sa propre loi de distribution des défaillances et de son propre taux de défaillance. Dans d'autres cas, le résultat est combiné à une fiabilité estimée pour l'ensemble des produits.

Lors de la planification d'un essai, il convient d'énumérer les modes de défaillance potentiels de l'entité. L'essai est ensuite planifié selon les niveaux et les durées de contrainte de sorte qu'il convient de pouvoir observer les modes de défaillance au cours de l'essai s'ils sont présents dans le produit. Pour cette planification, les facteurs empiriques obtenus de produits antérieurs, des fournisseurs de composants ou de la documentation spécialisée, peuvent être

utilisés pour estimer le facteur d'accélération de l'essai. A l'issue de l'essai, les modes de défaillance réels sont connus et l'essai peut être analysé pour chaque mode de défaillance séparément. Il est recommandé d'utiliser un montage d'essai permettant d'estimer les facteurs empiriques à partir de l'essai proprement dit. Voir les Annexes F et G.

Les essais de Type B peuvent être exécutés en augmentant le niveau des diverses charges telles que les charges thermiques (par exemple, la température, le cycle thermique et les taux de variation de la température), les charges chimiques (par exemple, l'humidité, des produits chimiques corrosifs tels que les acides et les sels), les charges électriques (par exemple, tension, intensité, puissance en régime établi ou transitoire) et les charges mécaniques (par exemple, déformations mécaniques cycliques quasi-statiques, vibrations et chocs/impulsions/impacts). L'environnement de l'essai accéléré peut comporter une combinaison de ces diverses charges. L'interprétation des résultats pour les charges combinées et leur extrapolation aux conditions du cycle de vie, exige une connaissance quantitative des interactions relatives des différentes contraintes d'essai et la contribution de chaque type de contrainte au dommage global.

5.2.2.2 Avantages des essais de Type B

Les essais accélérés sous contrainte fournissent des informations quantitatives sur la fiabilité des produits en essai:

- ce type d'essai peut être conçu
 - pour les modes de défaillance sélectionnés (par exemple, à partir d'une analyse AMDE) pour évaluer avec une confiance raisonnable la fiabilité globale;
 - pour les contraintes combinées, de manière à simuler les effets interactifs de ces contraintes et d'obtenir une évaluation réaliste de la fiabilité du produit;
- l'accélération des essais peut être efficacement réalisée pour que l'essai représente les dommages cumulés en utilisation.

5.2.2.3 Inconvénients des essais de Type B

- risque que l'accélération des contraintes dépasse les caractéristiques physiques des matériaux utilisés dans le produit et donne lieu à des dommages imprévus;
- risque que l'accélération des contraintes combinées fasse subir au produit des dommages supplémentaires imprévus qui n'auraient pas lieu dans les conditions d'utilisation réelles;
- le référentiel applicable aux essais d'accélération n'est pas une contrainte unique mais considère généralement plusieurs contraintes qui varient en fonction de l'utilisateur et de l'emplacement. Ceci nécessite d'être pris en compte dans le cadre de la quantification des résultats.

5.2.3 Essais de Type C, compression temporelle (C_1) et des événements (C_2)

5.2.3.1 Essais de Type C_1

5.2.3.1.1 Généralités

La compression temporelle est réalisée en éliminant le «temps d'inactivité» (par exemple, le temps non opérationnel) par compression du cycle d'utilisation en tenant uniquement compte du temps d'activité. En outre, lorsque les produits sont exposés à une grande variété de contraintes, il arrive souvent que les contraintes les plus élevées (les contraintes primaires) génèrent le plus de dommages et certains niveaux de contrainte d'utilisation, comparés aux contraintes primaires, sont supposés n'entraîner que des dommages négligeables. On peut supposer que toute exposition à un niveau de contrainte inférieur à un seuil de dommage donné générera des dommages négligeables et peut être retirée du programme d'essai. Ceci est notamment vrai pour les fatigues mécaniques et cette hypothèse est souvent appliquée à des essais accélérés de fatigue structurelle (voir la CEI 60605-2).

Un exemple de compression du cycle d'utilisation est l'application d'une durée d'essai de 24 h par jour, alors que le produit, dans son environnement d'utilisation réel, ne fonctionne que 8 h

par jour, ce qui donne un facteur de compression temporelle de 3. Chaque durée d'essai d'un jour équivaut à une utilisation réelle de 3 jours.

5.2.3.1.2 Avantages des essais de compression temporelle

Les produits ayant une durée d'utilisation minimale ou un temps de fonctionnement court par rapport au temps calendaire peuvent être soumis aux essais au cours d'une période d'essai très raisonnable par rapport à la durée de vie requise (par exemple, du matériel bureautique, des automobiles, des machines de récolte, etc.). Un chasse-neige est, par exemple, utilisé pendant une seule saison et une fois par an et seulement s'il y a suffisamment d'accumulation de neige pour que son usage soit nécessaire. Même lorsqu'il est utilisé, il est prévu qu'il soit actif pendant en moyenne 2 h à 3 h. Il est soumis à plusieurs contraintes primaires dommageables, telles que les vibrations, les contraintes du moteur, l'usure des lames, etc. Pendant le reste de l'année, il est rangé dans un abri et protégé contre les principaux agents atmosphériques. Ainsi, un chasse-neige qui a une durée de vie requise de dix ans, mais qui n'est effectivement utilisé que quatre fois par mois pendant trois mois, pendant une durée de 2 h, peut être soumis à des essais de durée d'utilisation requise de 240 h. Par conséquent, une durée d'essai d'environ 300 h constituerait une bonne marge pour démontrer la haute fiabilité du chasse-neige.

La durée de l'essai aux contraintes nominales étant relativement courte, il n'y a aucune raison d'augmenter les contraintes et, par conséquent, il n'est pas nécessaire de déterminer les facteurs d'accélération sous peine de soumettre l'UUT à des contraintes exagérées.

5.2.3.1.3 Inconvénients des essais de compression temporelle

Le fait de se concentrer exclusivement sur le temps opérationnel signifie la prise en compte de l'environnement opérationnel uniquement, avec les modes de défaillance correspondants, tandis que les modes de défaillance en environnements "non opérationnels" peuvent être laissés de côté. Ces derniers pourraient se révéler plus dommageables pour le produit, sachant qu'ils résultent de contraintes qui sont peut-être beaucoup plus faibles que celles auxquelles le produit est soumis en utilisation, mais appliquées pendant des durées beaucoup plus longues, de sorte qu'elles peuvent générer des dommages cumulés identiques, voire supérieurs à ceux des contraintes appliquées en cours d'utilisation.

En prenant toujours le même exemple du chasse-neige et en tenant compte des 87 600 h de sa durée de vie de dix ans, le chasse-neige est exposé à des températures extrêmement froides pendant environ 20 000 h, ce qui entraîne un mode de défaillance par fragilisation des matériaux, à une température extrêmement élevée, pendant environ 6 000 h, ce qui entraîne un vieillissement des pièces en plastique, de la peinture et des adhésifs ainsi qu'un cycle thermique d'environ 7 200 cycles entraînant de multiples dommages structurels, outre l'humidité appliquée pendant au moins 30 000 h par an, ce qui entraîne une corrosion importante. Des essais effectués uniquement aux conditions opérationnelles ne tiendraient pas compte des effets de ces environnements non opérationnels.

Pour les produits comportant des durées d'activité beaucoup plus courtes que les périodes de passivité (temps d'inactivité), il est nécessaire de combiner les essais à accélération temporelle des périodes opérationnelles à des essais qui accélèrent les périodes de passivité, comme par exemple des essais de corrosion, d'humidité, etc. Dans certains cas, le produit peut être pré-conditionné avant les essais de compression temporelle, en appliquant certaines contraintes subies pendant les périodes de passivité, comme par exemple l'humidité, le stockage dans des conditions de froid extrême, le rayonnement solaire ou des charges mécaniques telles que des vibrations et des chocs simulant les conditions de non fonctionnement. L'objectif de ce pré-conditionnement est de simuler l'interrelation des modes de défaillance en utilisation active avec les modes de défaillance prévus en stockage, qui, à leur tour, affectent grandement les modes de défaillance en utilisation. Par exemple, la corrosion du chasse-neige pourrait grandement affecter l'influence des vibrations appliquées à la structure du produit.

5.2.3.2 Essais de type C_2

5.2.3.2.1 Généralités

Les essais de compression d'événements appliquent des répétitions d'événements à des taux beaucoup plus élevés que ceux subis par le produit en utilisation réelle. Par exemple, le cycle de MARCHE/ARRET de l'unité mentionnée ci-dessus (le chasse-neige) peut être comprimé en un essai de plusieurs heures, en appliquant le cycle de MARCHE/ARRET de manière répétée. Par conséquent, les 120 cycles MARCHE/ARRET exigés au cours de la durée de vie de 10 ans, avec une marge suffisante permettant de démontrer la fiabilité, seraient un essai très court.

Les essais de Type C_2 peuvent être associés aux essais de compression temporelle pour obtenir une accélération supplémentaire des essais. Ceci peut donner lieu à un essai très court avec démonstration d'une "haute fiabilité"; cependant, cette accélération combinée doit être accompagnée de nombreuses précautions importantes. Par exemple, l'application rapide de contraintes répétées peut affecter les résultats d'essai par variation des dommages cumulés.

Les essais de compression d'événements peuvent également être combinés aux essais d'accélération des contraintes pour raccourcir encore plus la durée de l'essai. Il convient de prendre les précautions nécessaires lors de la préparation de ces essais, car la compression temporelle peut influencer l'accélération des contraintes. Par exemple, un cycle de MARCHE/ARRET rapide entraîne, en une très courte période, le passage à l'état ARRET qui, dans ce cas, ne laisse pas à l'UUT le temps de se refroidir correctement. Ceci peut entraîner une accélération thermique supplémentaire de l'UUT et une défaillance précipitée. De même, ce type d'accélération peut omettre les défaillances dues à la non-utilisation, comme, par exemple, la détérioration des matériaux.

5.2.3.2.2 Avantages de l'essai de type C_2

L'avantage de l'essai de Type C_2 est qu'en une courte période, en accélérant la répétition des contraintes, il est possible de reproduire les dommages cumulés sur une durée beaucoup plus courte qu'en utilisation normale.

5.2.3.2.3 Inconvénients de l'essai de type C_2

Ce type d'essai peut également générer des effets négatifs par application de contraintes continues entraînant des défaillances précipitées qui, normalement, ne seraient pas apparues. Par exemple, l'application d'un frottement continu à des pièces mécaniques, qui entraîne une usure par frottement en fonctionnement, peut produire de la chaleur qui pourrait précipiter une défaillance, alors qu'en usage normal, celle-ci serait retardée par des périodes de refroidissement. Un autre exemple pourrait être la fatigue du métal, due à la répétition des contraintes si ces dernières sont appliquées sans donner au matériau le temps de relaxation nécessaire.

5.3 Mécanismes de défaillance et conception des essais

L'importance d'une bonne analyse des défaillances doit être fortement soulignée. Il est essentiel de comprendre les mécanismes de défaillance pour concevoir et réaliser avec succès des essais de durée de vie accélérés ou autres, tels que les préconisent les méthodes de conception et de prédiction de la fiabilité fondées sur les caractéristiques physiques des défaillances (à condition que lesdites prédictions soient fondées sur les caractéristiques physiques de la méthode d'évaluation des défaillances). Pour cela, on doit identifier une méthode rationnelle permettant de corréliser quantitativement les résultats des essais accélérés à la fiabilité ou aux taux de défaillance dans des conditions d'utilisation, en utilisant une transformée d'accélération scientifique. L'importance de la compression temporelle d'essai réalisée au cours d'un essai accéléré doit être déterminée quantitativement, en se fondant sur les caractéristiques physiques des modes de défaillance pertinents. Les essais de durée de vie accélérés tentent de réduire la durée nécessaire à l'observation des défaillances. Dans certains cas, il est possible de les réaliser sans modifier réellement

l'équation du taux instantané de défaillance. Cependant, si la fonction de danger change, elle est appelée "modèle de danger proportionnel". Mathématiquement, la différence entre les deux est perceptible dans les deux équations ci-dessous, pour une loi de Weibull dans laquelle $H_{AL}(t)$ est la fonction de danger cumulé pour la durée de vie accélérée, $H_{PH}(t)$ est la fonction de danger cumulé pour le modèle de danger proportionnel, AF est un facteur d'accélération dû à un certain type de stimulus et $(t/\eta)^\beta$ est le danger cumulé non modifié pour une loi de Weibull (t = temps, η = durée de vie caractéristique et β = paramètre de forme).

$$H_{AL}(t) = \left(\frac{AF \times t}{\eta} \right)^\beta \quad (1)$$

$$H_{PH}(t) = AF \times \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \quad (2)$$

Dans la fonction $H_{AL}(t)$, le temps est une fonction linéaire de la fonction d'accélération. Dans la fonction $H_{PH}(t)$, la fonction de danger proprement dite est modifiée. En réaménageant l'équation pour $H_{PH}(t)$, on peut voir que le temps est une fonction non linéaire du facteur d'accélération. La différence entre ces deux types d'essais accélérés est que $H_{AL}(t)$ exige uniquement que soit connu le rapport de la durée d'essai réelle au temps calendaire (durée non accélérée) résultant du stimulus environnemental appliqué, tandis que $H_{PH}(t)$ exige que soit connue la manière dont le facteur AF change en fonction du paramètre β . Pour la loi de Weibull, dont la distribution exponentielle est un cas particulier, la distribution résultante demeure dans les deux cas une loi de Weibull.

L'Equation (1) est en général appliquée lorsque l'accélération est effectuée au taux de répétition augmenté des contraintes répétitives appliquées comme par exemple le cycle de fonctionnement. Il est préférable d'utiliser l'Equation (2) lorsque l'accélération est appliquée aux états physiques de l'unité en essai, comme par exemple l'accélération thermique (mouvement brownien), où le facteur d'accélération proprement dit dépend de la distribution.

Pour résumer le raisonnement ci-dessus, on peut dire que l'accélération des contraintes assure une réduction de la durée de fonctionnement avant défaillance en augmentant les niveaux des contraintes au-delà de celles prévues en utilisation normale de l'entité.

5.4 Détermination des niveaux de contrainte, profils et combinaisons en utilisation et en essai – Modélisation des contraintes

5.4.1 Généralités

Il est également important de comprendre les contraintes opérationnelles et environnementales qui génèrent le mode de défaillance sur la base des caractéristiques physiques de la défaillance. Cette modélisation des contraintes sert de point de référence de départ de l'accélération. La manière dont ce référentiel est traité est extrêmement importante lorsque les contraintes varient en fonction de l'utilisation du produit.

5.4.2 Méthode pas-à-pas

La procédure suivante doit s'appliquer:

- identifier les facteurs de contrainte pertinents sur le terrain, y compris durant le stockage et le transport (voir la série CEI 60721);
- déterminer les types de contraintes à accélérer, celles qui seront utilisées avec leurs valeurs nominales et celles qui peuvent être omises, par exemple parce qu'elles sont couvertes par d'autres essais;
- déterminer si les contraintes peuvent être appliquées simultanément, de manière à inclure des interactions de contraintes ou si elles sont à appliquer successivement, comme, par exemple, au cours d'un cycle d'essai (voir la CEI 60605-2);

- d) déterminer si le facteur d'accélération (A) peut être estimé à partir de l'essai ou estimer les facteurs d'accélération sur la base des équations d'accélération et des facteurs empiriques applicables;
- e) déterminer l'effectif de l'échantillon (voir la CEI 61649, la CEI 61123 et la CEI 61124);
- f) réaliser l'essai (voir la CEI 60300-3-5);
- g) procéder à l'analyse des défaillances;
- h) analyser l'essai – séparément pour chaque mode de défaillance (voir la CEI 61649, la CEI 61710 et la CEI 61124);
- i) rendre compte des résultats d'essai (voir la CEI 60300-3-5).

5.5 Méthode d'accélération de contraintes multiples – Essais de Type B

Dans le cas où deux contraintes ou plus sont à l'origine d'interactions affectant la durée de vie du composant ou du produit (fiabilité), l'accélération d'essai est effectuée en augmentant chaque contrainte individuelle sur la base de modèles appropriés aux contraintes concernées. Dans ce cas, les taux de défaillance représentant chacun des mécanismes de défaillance sont accélérés séparément et la fiabilité globale (R) ou la probabilité de défaillance (F) doit être estimée séparément. Ceci peut être exprimé sous la forme générale suivante:

$$R = \prod_{i=1}^{N_S} R_i \quad (3)$$

où

R_i représente l'influence d'une contrainte i sur la fiabilité de l'UUT lorsque les contraintes sont indépendantes;

R représente la fiabilité de l'UUT;

N_S est le nombre total de contraintes indépendantes.

Le cas particulier des risques concurrents est décrit dans l'Annexe G de la CEI 61649:2008.

Si la durée de fonctionnement avant défaillance de tous les composants ou entités peut être modélisée par la distribution exponentielle, ceci peut être simplifié de la manière suivante:

$$\lambda_{Entité}(Contraint e) = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_S} \lambda_i(Contraint e_i) \quad (4)$$

où

λ_U est le taux de défaillance inconnu.

Dans le cas de la loi de Weibull, lorsque toutes les distributions des modes de défaillance ont le même paramètre de forme, le paramètre d'échelle d'une entité soumise à des contraintes combinées est le suivant:

$$\frac{1}{\eta_{Entité}^{\beta}(Contraint e)} = \frac{1}{\eta_U^{\beta}} + \sum_{i=1}^{N_S} \frac{1}{\eta_i^{\beta}(Contraint e_i)} \quad (5)$$

où

β est le paramètre de forme de la loi de Weibull

$\eta_{Entité}$ est le paramètre d'échelle d'une entité pour la combinaison de contraintes individuelles;

η_b est le paramètre d'échelle de base;

η_i sont les paramètres d'échelle déterminés pour des contraintes individuelles.

En cas de paramètres de forme différents, la distribution qui en résulte peut être différente de la loi de Weibull et la complexité des relations correspondantes dépasse le domaine d'application de la présente norme.

Il est à noter que la loi de Weibull peut être uniquement utilisée lorsqu'il s'agit d'accélérer des modes de défaillance uniques, car elle comporte une dépendance des durées de fonctionnement avant défaillance, sachant que la modélisation de Weibull n'est pas applicable au mélange de différents modes de défaillance. Les durées de fonctionnement avant défaillance ne sont pas liées dans le cas de modes de défaillance différents, même si un seul composant est concerné.

L'Equation (3) présente une méthode plutôt précise d'expression du taux de défaillance global de l'entité avec application des contraintes. On suppose que le taux de défaillance de la pièce/composant est la somme d'un taux de défaillance de base, résultant de modes de défaillance indéterminés liés aux défauts intrinsèques de la pièce, et des taux de défaillance attribués aux modes de défaillance sensibles à des contraintes particulières et qui sont accélérés par ces contraintes. Ainsi, les taux de défaillance représentant des contraintes individuelles peuvent être déterminés par des essais de contraintes séparés. Les accélérations de contraintes individuelles s'appliquent donc à chacun de ces modes de défaillance liés à une défaillance particulière.

Si chaque type de contrainte accélère un et un seul mode de défaillance, le facteur d'accélération affectera chaque mode de défaillance séparément. Si l'on suppose qu'il existe une distribution exponentielle, ce qui est le cas lorsque les ensembles et les systèmes sont soumis à des essais pour plusieurs modes de défaillance différents, le taux de défaillance d'une entité après accélération est le suivant:

$$A \cdot \lambda_{Entité} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{N_S} A_i \cdot \lambda_{Entité}(\text{Contrainte } i) \quad (6)$$

En laissant de côté la valeur λ_0 , qui est infime au vu des taux d'occurrence de tous les modes de défaillance, et en gardant à l'esprit que le même mode de défaillance peut être accéléré par plusieurs contraintes, l'accélération d'essai de l'Equation (6) devient l'Equation [7]:

$$\lambda_A = A_{Essai} \cdot \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \lambda_i \right) \quad (7)$$

où

λ_0 est le taux de défaillance de l'entité dans des conditions d'utilisation;

λ_A est le taux de défaillance de l'essai accéléré;

A_i est le facteur d'accélération pour chacune des contraintes augmentées de l'essai;

$\left(\prod_k A_k \right)_i$ est le produit des facteurs d'accélération des contraintes, i , affectant le mode de défaillance k .

λ_i est le taux de défaillance de l'entité correspondant à la contrainte spécifique.

N_S est le nombre de contraintes

A_{Essai} est le facteur d'accélération du taux de défaillance de l'entité dans des conditions d'utilisation pour produire le taux de défaillance global de l'essai accéléré

$$A_{Essai} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad (8)$$

Si le taux de défaillance λ_i est défini en terme de fiabilité à un moment prédéterminé t_0 , $R_i(t_0)$ dans ce cas l'accélération d'essai est la suivante:

$$A_{Essai} = \frac{\sum_{i=1}^S \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \cdot \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (9)$$

Si toutes les contraintes affectent tous les modes de défaillance, les facteurs d'accélération résultants (A_i) peuvent être multipliés. Ceci peut être une manière plus facile ou plus simple de calculer le taux de défaillance total de la pièce sous la forme de son taux de défaillance de base, modifié par plusieurs contraintes environnementales composées:

$$\lambda_{Entité}(Contrainte) = \lambda_U \cdot \prod_{i=1}^{N_S} A_i \quad (10)$$

L'Equation (10), bien que largement utilisée dans l'industrie, suppose que chaque contrainte appliquée accélère le taux de défaillance de base et que la contrainte suivante appliquée accélère le taux de défaillance total accéléré par la contrainte précédente et ainsi de suite. Cette approche simpliste peut entraîner une surestimation des effets des contraintes multiples sachant que les mécanismes de défaillance sont différents et que certains ne sont pas accélérés par toutes les contraintes.

La surestimation de l'accélération entraîne une surestimation de la probabilité de défaillance ou donne des essais qui sont abusivement courts et inappropriés.

La meilleure manière d'obtenir un calcul réaliste de l'accélération d'essai est de rechercher les contraintes qui influencent effectivement les mêmes modes de défaillance, auquel cas elles peuvent être multipliées.

5.6 Accélération de contraintes uniques et multiples pour des essais de Type B

5.6.1 Méthode d'accélération de contraintes uniques

Avec cette méthode, l'accélération d'essai est réalisée avec une seule contrainte uniquement. Ces modèles sont des modèles de contraintes au cours de la durée de vie du produit, dans lesquels les dommages par unité de temps d'essai sont accélérés de manière appropriée en augmentant le niveau des contraintes.

Les trois relations les plus fréquemment utilisées sont les suivantes:

- le modèle de loi de puissance inverse, utilisé pour l'accélération de l'essai lorsque des contraintes autres qu'une température constante sont prises en compte, comme par exemple des contraintes électriques, mécaniques, chimiques (corrosion) et autres;
- le modèle du taux de réaction d'Arrhenius, utilisé pour des contraintes à température constante, fondé sur l'effet de la température absolue sur un mécanisme de défaillance;
- le modèle d'Eyring, utilisé lorsque la température et l'humidité sont les niveaux de contrainte. Le modèle est dérivé de la mécanique quantique.

Quel que soit le modèle d'accélération, les données d'essai peuvent être analysées au moyen de modèles d'analyse établis permettant de déterminer les paramètres caractéristiques de durée de vie accélérée. Les facteurs d'accélération permettent de déterminer les paramètres correspondant aux environnements d'utilisation qui sont employés si nécessaire pour obtenir des projections de fiabilité. Il convient dans toute la mesure du possible de vérifier les modèles d'accélération en traçant les courbes de données d'essai.

5.6.1.1 Loi de puissance inverse

La loi de puissance inverse est applicable:

- aux contraintes dynamiques telles que les chocs (tout type d'impulsion) et les vibrations (sinusoïdales et aléatoires);
- aux contraintes climatiques telles que le cycle thermique, les variations de température (chocs et cycle thermique), l'humidité, le rayonnement solaire ou toute autre contrainte climatique à dommages cumulés.

Le modèle de loi de puissance inverse est très simple à comprendre et à utiliser et très facilement adaptable à toute distribution des défaillances. Il est possible d'utiliser des solutions graphiques (ajustement optimal au jugé) et les paramètres peuvent également être déterminés en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance [10].

Avec la loi de puissance inverse, la caractéristique qui représente la fiabilité du produit en fonction du temps, telle que la durée de vie caractéristique, la durée de vie moyenne, le temps moyen avant défaillance, est représentée de la manière suivante:

$$L(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad (11)$$

où

S est la contrainte;

C est la constante (>0) à déterminer;

m est le paramètre dépendant du comportement en contrainte, également à déterminer;

$L(S)$ est la durée de vie ou autre durée temporelle prédéterminée en fonction de la contrainte.

Le modèle de loi de puissance est simple lorsqu'il est exprimé ou tracé sous forme logarithmique: ligne droite dont la pente représente la valeur du paramètre m , et l'intersection avec l'axe y est fonction de la constante C :

$$\ln[L(S)] = -m \times \ln(S) - \ln(C) \quad (12)$$

La loi de puissance inverse est applicable à toutes les distributions couramment utilisées en matière de fiabilité.

Le facteur d'accélération d'essai est alors:

$$A_{S_IPL} = \frac{L(S_{Utilisation})}{L(S_{Essai})} = \frac{C^{-1} \cdot S_{Utilisation}^{-m}}{C^{-1} \cdot S_{Essai}^{-m}} = \left(\frac{S_{Essai}}{S_{Utilisation}} \right)^m \quad (13)$$

où

A_{S_IPL} est l'accélération de la contrainte par la loi de puissance inverse;

$L(S_{Utilisation})$ est la durée de vie en fonction des contraintes en utilisation réelle;

$L(S_{Essai})$ est la durée de vie en fonction de la contrainte appliquée au cours de l'essai.

Dans l'équation ci-dessus, les indices «essai» et «utilisation» représentent respectivement la condition d'essai accélérée et la condition d'utilisation non accélérée.

Le paramètre C de l'accélération d'essai s'annule, mais le paramètre m doit être déterminé pour l'entité et le type de contrainte.

S'il n'est pas déjà connu, le paramètre m peut être déterminé par des essais réalisés sur le même composant ou entité à divers niveaux de contrainte jusqu'à défaillance (Annexe F). Les données d'essai sont ensuite analysées pour déterminer la distribution et les paramètres correspondants. Le paramètre de la distribution qui correspond à la durée de vie est ensuite tracé en fonction de la contrainte en coordonnées bilogarithmiques, et la pente de la ligne droite détermine la valeur du paramètre m tandis que l'intersection négative donne la valeur de la constante C .

Le processus, qui semble simple lorsqu'il est décrit, peut devenir pénible pour des entités plus complexes qu'un composant unique, car l'essai peut nécessiter beaucoup de temps et un grand nombre d'échantillons. Par ailleurs, l'utilisation de facteurs d'accélération d'essai grossièrement estimés peut donner lieu à d'importantes erreurs de conception des essais accélérés.

Lorsque la courbe contrainte-durée de vie est extrapolée bien au-delà des points d'essai, la courbe contrainte-durée de vie prévisionnelle peut correspondre à une estimation plus prudente de la durée de vie sachant que la courbe contrainte-durée de vie réelle pour le mode de défaillance spécifique peut présenter une pente plus basse.

La loi de puissance inverse est en général applicable aux contraintes de chocs thermiques, électriques et mécaniques (statiques et dynamiques) et à l'humidité.

Pour accélérer l'essai de durée de vie d'un composant avec une contrainte spécifique, il convient de bien comprendre et de regrouper les défaillances correspondant au même mode de défaillance afin de s'assurer que les contraintes appliquées génèrent le même mécanisme de défaillance. Par exemple, l'essai d'accélération d'un condensateur en céramique pour puce électronique muni d'électrodes en nickel, réalisé par une augmentation de la tension, peut présenter deux mécanismes de défaillance différents: défaillance par claquage et par mouvement des lacunes d'oxygène, qui entraînent toutes deux un court-circuit du condensateur. Ces deux mécanismes peuvent apparaître comme étant le même mode de défaillance car il serait difficile de les distinguer si les défaillances n'étaient pas analysées. L'un des indicateurs de la présence de deux mécanismes de défaillance différents pourrait être une loi de distribution de Weibull bimodale résultante (voir la CEI 61649).

Pour chacune des distributions, les limites de confiance des paramètres et les fonctions de durée de vie et de fiabilité peuvent être déterminées en utilisant des données statistiques appropriées, comme par exemple celles décrites dans la CEI 61649. Du fait du faible effectif de l'échantillon, il convient d'utiliser avec précaution les limites statistiques appliquées à la courbe contrainte-durée de vie; il est en effet possible d'obtenir des résultats incorrects de la courbe contrainte-durée de vie extrapolée.

5.6.1.1.1 Avantages du modèle de loi de puissance inverse

Le principal avantage de ce modèle réside dans sa simplicité et la facilité avec laquelle il permet de déterminer les paramètres obtenus d'un essai, à condition de pouvoir facilement séparer les modes de défaillance. Il présente également l'avantage d'être largement utilisé ce qui permet de trouver les valeurs spécifiques des paramètres dans l'abondante documentation spécialisée.

5.6.1.1.2 Inconvénients du modèle de loi de puissance inverse

Ce modèle présente les inconvénients suivants:

- la simplicité du modèle peut entraîner des erreurs de correspondance avec les paramètres relatifs à la durée de vie des différentes distributions;
- bien souvent, les contraintes temporelles et économiques ne permettent pas de déterminer les paramètres de la loi de puissance inverse et on utilise donc les valeurs moyennes communes qui peuvent induire en erreur;
- pour être statistiquement défendables, les essais de défaillance nécessitent un grand nombre d'échantillons à soumettre à chacune des contraintes choisies. Les composants soumis aux contraintes faibles peuvent nécessiter une durée d'essai plus longue et, au cas où il y aurait également un niveau de fiabilité élevé, il peut être nécessaire de disposer d'un effectif d'échantillons important et l'essai peut prendre beaucoup de temps;
- il convient de choisir avec précaution la valeur supposée du paramètre m , empruntée à un produit apparemment similaire.

5.6.1.2 Modèle d'Arrhenius

Le modèle d'Arrhenius est fondé sur l'expression du taux de réaction en fonction du type de composant et de son mode de défaillance, ainsi que de la température absolue, T . Ce modèle suppose que le taux de réaction dépend de manière exponentielle de la température absolue.

Le taux de réaction est exprimé comme suit:

$$\rho(T) = K \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T}} \quad (14)$$

où

K est la constante (non fonction de la température);

E_a est l'énergie d'activation (eV);

k_B est la constante de Boltzman = $8,617385 \times 10^{-5}$ eV/K;

T est la température absolue (K);

$\rho(T)$ est le taux de réaction en fonction de la température absolue.

Une durée de vie fiable en fonction de la température peut être exprimée comme suit:

$$L(T) = C \times e^{\frac{D}{T}} \quad (15)$$

Pour représenter l'équation ci-dessus comme une ligne droite:

$$\ln[L(T)] = \frac{D}{T} + \ln(C) \quad (16)$$

où

T est la température absolue variable mesurée en degrés K (température absolue);

D est la pente de la ligne droite ($= -E_a/k_B$);

$\ln(C)$ est l'intersection de la ligne droite avec l'axe Y.

Le facteur d'accélération est alors calculé pour l'environnement d'utilisation et d'essai comme le rapport des deux taux de réaction:

$$A = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} = \frac{K \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}}}{K \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_0}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (17)$$

Les taux de défaillance en fonction de la température absolue, T , peuvent être corrélés au taux de défaillance à une température absolue spécifiée, T_0 , de la manière suivante:

$$\lambda(T) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}} \quad (18)$$

En définissant le taux de défaillance λ_0 à une température spécifiée T_0 :

$$\lambda_0(T_0) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_0}} \quad (19)$$

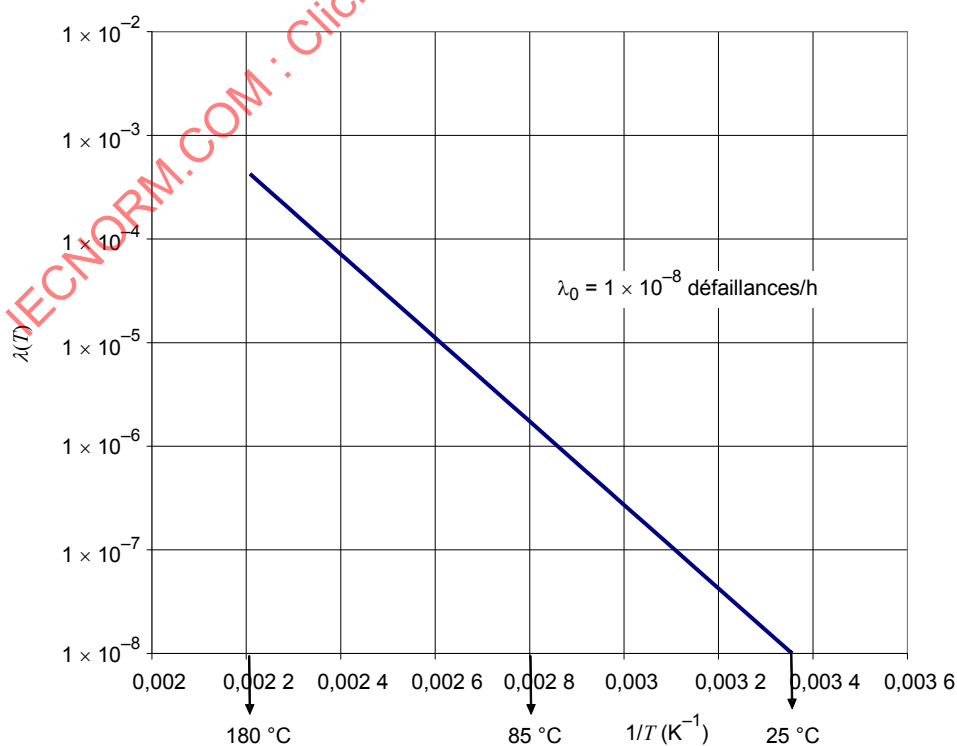
La division des Equations (18) et (19) donnera la relation suivante:

$$\lambda(T) = \lambda_0(T_0) \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (20)$$

où

T_0 et T sont les températures absolues dans l'environnement d'utilisation et d'essai, respectivement.

La Figure 5 illustre un exemple d'utilisation du modèle d'Arrhenius de détermination de la valeur du taux de défaillance λ_0 qui, à une température de 25 °C (298 K), était de 1×10^{-8} défaillances/h, en fonction de la température absolue, T .



IEC 1384/13

Figure 5 – Tracé du modèle de réaction d'Arrhenius

Il convient que le paramètre E_a (énergie d'activation) soit connu pour être utilisé avec le modèle d'Arrhenius. L'énergie d'activation peut être estimée comme décrit dans l'Annexe D, mais cela prend beaucoup de temps. Les fabricants de composants estiment l'énergie d'activation pour les modes de défaillance pertinents à chaque fois qu'ils qualifient une nouvelle technologie de composants. L'estimation est le plus souvent effectuée sur des structures d'essai et non sur des composants fonctionnels. L'énergie d'activation estimée est ensuite appliquée à tous les composants utilisant la technologie qualifiée. Par conséquent, le fournisseur de composants sera en général capable d'indiquer l'énergie d'activation pour les modes de défaillance dominants d'un composant donné.

L'énergie d'activation peut être déterminée à partir du tracé de la Figure 5 en résolvant l'équation utilisée pour le tracé du taux de défaillance, en l'appliquant à E_a de la manière suivante:

$$E_a = k_B \cdot \frac{\{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)\}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (21)$$

$$E_a = k_B \cdot SLOPE$$

Légende

Français
Pente

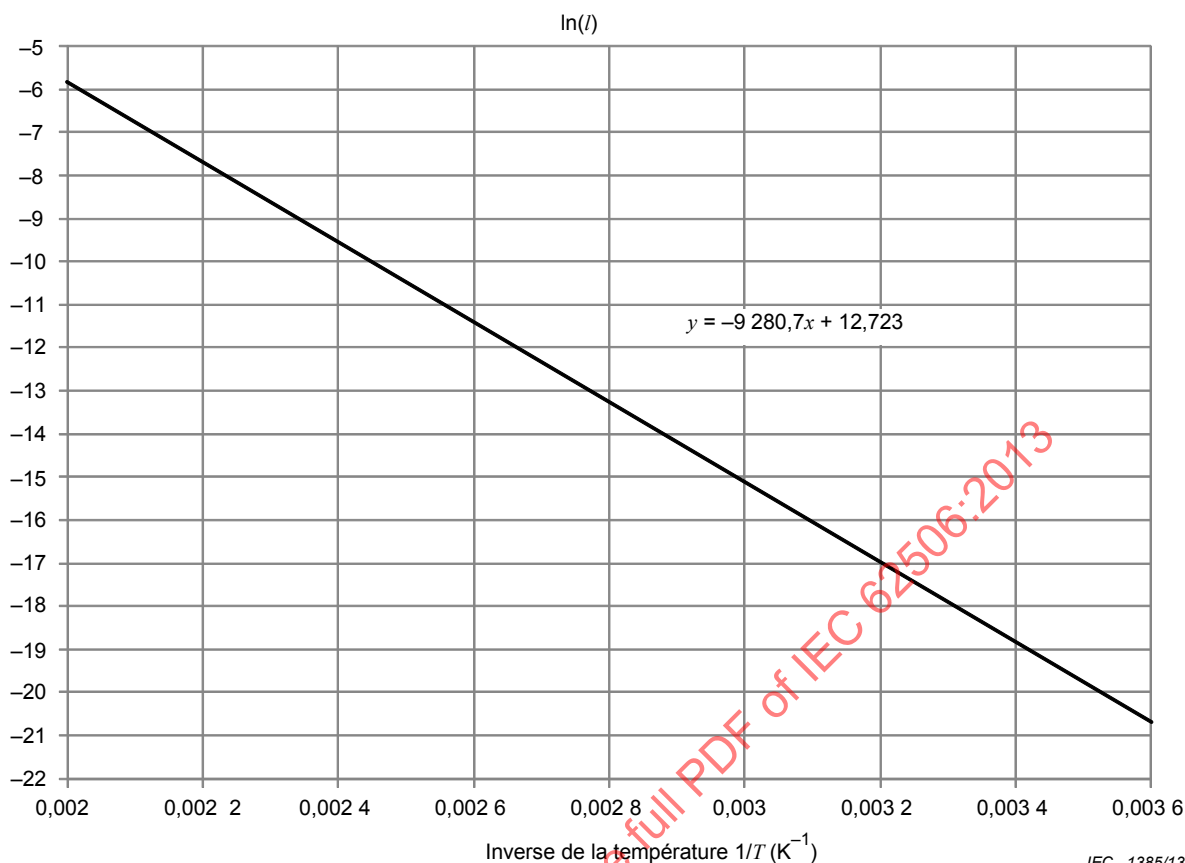
Anglais
Slope

où

λ_0 = 1×10^{-8} défaillances/h;
 $\ln(\lambda_0)$ = -18,421;
 T_0 = 25 °C = (25 + 273) K = 298K;
 $\ln(\lambda_F)$ = -7,764 5;
 T_F = 180 °C = (180+273)K = 453K;
 E_a = 0,8 eV.

$$PENTE = \frac{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}$$

La Figure 6 illustre la détermination de l'énergie d'activation.



IEC 1385/13

Figure 6 – Tracé de détermination de l'énergie d'activation

La méthode d'Arrhenius est applicable à de nombreuses distributions statistiques utilisées en analyse de la fiabilité.

Les limites de confiance des paramètres ainsi que les fonctions de durée de vie et de fiabilité pour chacune des distributions peuvent être déterminées en utilisant des données statistiques appropriées.

5.6.1.2.1 Applicabilité du modèle

Ce modèle est applicable lorsque l'exposition thermique, sous la forme d'une température élevée constante, risque de causer des dommages cumulés des matériaux, modifiant ainsi leurs propriétés physiques. Les modifications des propriétés physiques peuvent ensuite être démontrées comme une modification des propriétés électriques et autres propriétés spécifiques.

Le modèle ne s'applique pas aux dommages dus à des basses températures. Pour ces dernières, il est conseillé d'utiliser des essais jusqu'à défaillance pour établir le modèle spécifique.

5.6.1.2.2 Avantages du modèle

Le modèle d'Arrhenius est simple à utiliser et, lorsque le mode de défaillance est véritablement dépendant uniquement de la température absolue, il peut donner une accélération d'essai réaliste.

5.6.1.2.3 Inconvénients du modèle

Le modèle est facile à appliquer pour des composants uniques, à condition que leurs taux de défaillance soient véritablement dépendants de la température et activés par elle. Pour des ensembles constitués de diverses pièces électroniques et mécaniques, le modèle peut être difficile à appliquer, sachant que les composants auront souvent des énergies d'activation thermique différentes pour des modes de défaillance divers (voir JESD85 [26] et l'Annexe G de la CEI 61649:2008).

5.6.1.3 Modèle d'Eyring

Comme le modèle d'Arrhenius, le modèle d'Eyring est principalement utilisé lorsque la contrainte thermique est un facteur déterminant pour l'accélération du processus. Contrairement au modèle d'Arrhenius, le modèle d'Eyring est également utilisé pour des contraintes autres que la température, telles que l'humidité ou d'autres réactions chimiques.

La fonction correspondant à la durée de vie prévue est exprimée comme suit:

$$L(S_E) = \frac{1}{S_E} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_E}\right)} \quad (22)$$

où

A et B sont les paramètres de fonction devant être déterminés par essai ou approchés à partir de valeurs tirées de la documentation spécialisée, par exemple CEI 60605-7 [14]. Le paramètre B peut être une constante, mais il est plus souvent fonction des autres contraintes, en général la température;

S_E est la contrainte telle qu'utilisée dans le modèle (en général la température absolue mesurée en degrés Kelvin);

$L(S_E)$ est la mesure de la durée de vie telle que le temps moyen avant défaillance (MTTF), la durée de vie caractéristique, la mi-vie, etc.

Avec ce modèle, le facteur d'accélération est le suivant:

$$A_{S_{-}E} = \frac{L(S_{E_Use})}{L(S_{E_Test})} = \frac{\frac{1}{S_{E_Use}} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_{E_Use}}\right)}}{\frac{1}{S_{E_Test}} \cdot e^{-\left(A \frac{B}{S_{E_Test}}\right)}} = \frac{S_{E_Test}}{S_{E_Use}} \cdot e^{B \left(\frac{1}{S_{E_Use}} - \frac{1}{S_{E_Test}} \right)} \quad (23)$$

use = utilisation
test = essai
Légende

Français
Utilisation
Essai

Anglais
Use
Test

où

$S_{E_Utilisation}$ et S_{E_Essai} sont, respectivement, les contraintes en utilisation et en essai;

B est une constante devant être déterminée par essai ou approchée à partir de valeurs extraites de la documentation spécialisée [10].

Le modèle d'Eyring peut être appliqué à toute distribution utilisée en analyse de la fiabilité.

Les limites de confiance des paramètres ainsi que les fonctions de durée de vie et la fiabilité pour chacune des distributions peuvent être déterminées en utilisant des données statistiques appropriées.

5.6.1.3.1 Avantages du modèle

Le modèle est relativement simple et s'applique à des contraintes autres que les contraintes thermiques. Pour un paramètre B connu, il est possible d'obtenir une accélération d'essai plutôt précise.

5.6.1.3.2 Inconvénients du modèle

Comme pour le modèle d'Arrhenius, il est important de connaître le paramètre B pour obtenir une accélération d'essai correcte. Pour des produits de complexité moyenne, la précision de l'accélération d'essai peut devenir discutable car les différents composants et matériaux ont une valeur de constante B différente.

5.6.2 Modèles de contraintes variables en fonction du temps – Essais de Type B

5.6.2.1 Généralités

Les modèles de contraintes qui varient en fonction du temps sont utilisés pour tenir compte de la précipitation des modes de défaillance, de manière à raccourcir la durée d'essai. Ces modèles peuvent être utilisés pour présentation d'un profil d'utilisation du produit et il s'agit alors du modèle de dommages cumulés ou d'exposition cumulée.

5.6.2.2 Modèle de contrainte échelonnée

Le modèle de contrainte échelonnée le plus souvent utilisé est celui où les unités en essai sont soumises à une succession de niveaux préétablis de contraintes croissantes appliquées pendant une durée prédéterminée [12], [6].

Les niveaux de contrainte sont constants au cours de chacun des intervalles de temps.

Le modèle peut être présenté mathématiquement, en utilisant les caractéristiques de durée de vie pour une loi de distribution supposée. Un exemple de représentation mathématique de contrainte échelonnée est présenté ci-dessous.

Si la fiabilité d'une unité d'essai, pour une durée d'essai t et une contrainte S représentée comme une loi de Weibull est

$$R(t, S) = e^{-\left(\frac{t}{\eta(S)}\right)^\beta} \quad (24)$$

où

$R(t, S)$ est la fiabilité en fonction du temps, t , et contrainte, S ;

β est le paramètre de forme de la loi de Weibull;

$\eta(S)$ est le paramètre d'échelle, une fonction de la contrainte, S .

Dans ce cas, la probabilité de défaillance est la suivante:

$$F(t, S) = 1 - R(t, S) \quad (25)$$

Dans les équations ci-dessus, en prenant comme exemple le modèle de loi de puissance inverse, la durée de vie caractéristique est la suivante:

$$\eta(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad (26)$$

Pour des contraintes successives (niveaux de contrainte) S_i , où $i = 1, 2, 3, \dots$

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-(C \cdot S_i^m \cdot t)^\beta} \quad (27)$$

Il convient d'analyser les données en utilisant la loi de distribution appropriée (dans le cas de l'exemple ci-dessus, la loi de Weibull), un modèle d'exposition cumulée qui permet de corréler les distributions de défaillances à deux niveaux successifs. La distribution de défaillance des unités d'essai de chaque échelon est spécifique audit échelon; cependant, l'instant zéro de chaque échelon particulier coïncide avec la durée totale d'essai cumulée avant ledit échelon d'essai.

On utilise une durée de vieillissement équivalente notée τ , pour tenir compte du vieillissement au niveau de contrainte précédent:

$$\tau_i = (t_i - t_{i-1}) \cdot \left(\frac{S_i}{S_{i-1}} \right)^m + \tau_{i-1} \quad (28)$$

Dans ce cas, la probabilité de défaillance au cours du segment, i , est la suivante:

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-(C \cdot S_i^m \cdot (t - t_{i-1}) + \tau_{i-1})^\beta} \quad (29)$$

Les paramètres de distribution peuvent ensuite être déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance ou d'autres méthodes.

Des limites de confiance peuvent également être établies pour la probabilité de la défaillance, la fiabilité ou toute autre mesure de la durée de vie du produit, comme décrit dans les normes correspondantes concernant les limites de confiance, en fonction de la distribution établie.

5.6.2.2.1 Avantages de la méthode

La méthode est efficace pour déceler les faiblesses potentielles d'un produit sur une courte période de temps. Les opérations mathématiques correspondantes ne sont pas trop compliquées, de sorte que la caractéristique de durée de vie d'un produit, liée à la contrainte particulière, peut être aisément calculée.

5.6.2.2.2 Inconvénients de la méthode

La méthode ne tient pas compte du vieillissement des unités d'essai pendant la durée d'application des échelons de contraintes précédents. Les durées utilisées ne sont pas suffisamment représentatives pour produire des modes de défaillance à dépendance temporelle, telles que l'usure, le fluage ou une fatigue méga cyclique. L'élément déterminant est l'intensité des contraintes. En outre, la méthode ne tient pas compte de la fatigue potentielle ou des modifications de matériaux qui résultent des contraintes répétitives. La fatigue potentielle peut précipiter les modes de défaillance qui apparaissent plus tôt qu'en situation normale si le facteur de fatigue n'était pas inclus et par conséquent donne une prévision erronée d'une durée de fonctionnement avant défaillance précoce. L'effet de la contrainte est en général logarithmique et il convient donc de ne pas utiliser un niveau de contrainte qui entraînerait une défaillance immédiate de l'UUT.

De même, la méthode ne suggère aucun moyen de prise en compte et de traitement de modes de défaillance non liés aux contraintes appliquées.

Il convient de ne pas dépasser les limites de destruction à court terme de l'UUT.

5.6.3 Modèles de contraintes dépendant de la répétition des applications de contraintes – Modèles de fatigue

5.6.3.1 Généralités

La fatigue peut être définie comme une détérioration progressive des matériaux de l'entité ou de la structure de l'entité lorsqu'ils sont soumis à des charges répétées. Ces charges peuvent être mécaniques, dynamiques, un cycle thermique, un cycle de tension électrique, etc. Lorsque des charges cycliques sont utilisées (thermiques, flexions et autres), la fatigue est proportionnelle à plusieurs paramètres, en général aux valeurs extrêmes de la charge (les différences entre les extrêmes), aux nombres de répétitions et à une vitesse de variation donnée.

Pour représenter la relation entre le nombre de répétitions de charges et le niveau de charge, l'essai est effectué sur un certain nombre d'entités à différents niveaux de contrainte, au cours d'une série d'essais. Il est effectué un tracé de la contrainte subie en fonction du nombre de cycles de contraintes appliqués ou d'applications pour lesquelles les défaillances n'ont pas eu lieu. Les niveaux de contrainte sont réduits et on augmente alors le nombre d'applications de contraintes. Cet essai se poursuit jusqu'au moment où, apparemment, la contrainte est suffisamment basse pour que l'entité puisse supporter un nombre "infini" d'applications. La valeur de la contrainte à ce point est appelée limite de fatigue. Tous les matériaux n'ont pas de limite de fatigue; les exceptions sont par exemple certains types d'alliages d'aluminium et de matières plastiques.

5.6.3.2 Calcul de la durée de vie selon la règle de Miner

La théorie du cumul linéaire du dommage en fatigue de Palmgren-Miner (règle de Miner) est utilisée pour calculer les durées de vie en fatigue par piqures ou flexions d'engrenages soumis à des charges qui ne sont pas d'amplitude constante mais qui varient sur une large plage. Selon la règle de Miner, la défaillance a lieu lorsque:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \quad (30)$$

où

n_i est le nombre de cycles au i -ème niveau de contrainte;

N_i est le nombre de cycles jusqu'à défaillance correspondant au i -ème niveau de contrainte;

n_i/N_i est le rapport du dommage (fraction de durée de vie) au i -ème niveau de contrainte.

En remplaçant le nombre de cycles par les durées de vie:

$$\frac{l_1}{L_1} + \frac{l_2}{L_2} + \dots + \frac{l_i}{L_i} + \dots + \frac{l_m}{L_m} = 1 \quad (31)$$

où

l_i est la durée au i -ème niveau de contrainte;

L_i est la durée de vie au i -ème niveau de contrainte;

l_i/L_i est le rapport du dommage au i -ème niveau de contrainte.

Si la durée à chacun des niveaux de contrainte est exprimée comme une fraction de la durée de vie totale, L :

$$\begin{aligned} l_1 &= \alpha_1 \times L \\ l_2 &= \alpha_2 \times L \\ l_i &= \alpha_i \times L \end{aligned} \quad (32)$$

où

α_i est la durée au i -ème niveau de contrainte;

L est la durée de vie jusqu'à défaillance sous l'ensemble des charges appliquées.

Si l'on applique aux durées de vie le même rapport qu'au nombre de cycles, dans ce cas:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1 \times L}{L_1} + \frac{\alpha_2 \times L}{L_2} + \dots + \frac{\alpha_i \times L}{L_i} + \dots + \frac{\alpha_m \times L}{L_m} &= 1 \\ L &= \frac{1}{\frac{\alpha_1}{L_1} + \frac{\alpha_2}{L_2} + \dots + \frac{\alpha_i}{L_i} + \dots + \frac{\alpha_m}{L_m}} \end{aligned} \quad (33)$$

Les charges sont définies par le rapport temporel, α_i , et le rapport de charge, β_i ; en outre, un rapport de vitesse, ω_i , est nécessaire pour le calcul des durées de vie admissibles L_i

où

β_i est le rapport entre la charge instantanée et la charge de base (globale);

ω_i est la vitesse instantanée/charge nominale.

Le diagramme des contraintes en fonction du nombre de cycles est tracé à partir des essais de fatigue; il est appelé courbe S-N. A partir d'une série de courbes S-N et en supposant que la loi de puissance inverse des niveaux de contrainte, m , décrite au 5.6.1.1 s'applique.

5.6.4 Autres modèles d'accélération – Compression temporelle et compression d'événements

5.6.4.1 Généralités

La CEI 61163-2 ainsi que [17] donnent d'autres modèles d'accélération.

5.6.4.2 Méthode pas à pas d'essais de compression d'événements et de compression temporelle (essais de Type C)

Etape 1: établir les facteurs qui peuvent subir la compression d'événements, et dans quelle mesure, sans modifier les modes de défaillance;

Etape 2: établir les périodes du profil de mission qui peuvent subir une compression temporelle et dans quelle mesure (CEI 60605-2);

Etape 3: estimer le(s) facteur(s) d'accélération pour les modes de défaillance potentiels (voir 5.2.2.1);

Etape 4: déterminer l'effectif de l'échantillon (voir la CEI 61649);

Etape 5: réaliser l'essai (voir la CEI 60300-3-5);

Etape 6: procéder à l'analyse des défaillances;

Etape 7: analyser les résultats d'essais pour chaque mode de défaillance séparément (voir la CEI 61649);

Etape 8: rendre compte des résultats (voir la CEI 60300-3-5).

5.7 Accélération d'essais de fiabilité quantitatifs

5.7.1 Exigences, objectifs et profils d'utilisation de la fiabilité

5.7.1.1 Généralités

Ce thème est approfondi et discuté de manière détaillée dans d'autres normes et documentations traitant de la sûreté de fonctionnement, mais, pour plus d'exhaustivité, certaines explications concises sont incluses dans la présente norme.

5.7.1.2 Profil d'utilisation du produit et du composant

Les fabricants choisissent fréquemment de soumettre un produit à des essais accélérés qui simulent les contraintes environnementales telles qu'elles sont rencontrées sur le terrain. Ces essais peuvent être destinés à s'assurer que les essais précédents (par exemple HALT) n'ont pas omis un mode de défaillance qui pourrait apparaître au cours de la durée de vie du produit ou d'estimer la fiabilité dudit produit sur le terrain. Dans certains cas, du fait de certaines contraintes liées à l'espace ou aux performances, le fonctionnement en charge partielle d'un ou de plusieurs composants du produit peut être insuffisant, ce qui peut donner une marge inappropriée de contraintes/robustesse. Dans ce cas, la fiabilité du produit peut fortement dépendre de la manière dont il est utilisé, des contraintes opérationnelles et environnementales, de leur combinaison et de leur ordre d'apparition dans le temps.

Un profil d'utilisation de produit est constitué des éléments suivants:

- les contraintes opérationnelles et environnementales, leur amplitude et leur ordre d'apparition;
- la durée et le nombre de segments de séquence.

Ces profils d'utilisation peuvent être choisis parmi l'une des conditions d'évaluation suivantes: profil d'utilisation moyen, profil d'utilisation agressif et un spectre des conditions du profil d'utilisation.

Il convient de connaître les contraintes et séquences opérationnelles jusqu'au niveau de l'ensemble des composants critiques et des composants qu'il peut être nécessaire de soumettre à des essais de fiabilité accélérés.

5.7.1.3 Objectifs ou exigences de fiabilité

Il convient d'exprimer l'objectif de fiabilité global en termes acceptables et compréhensibles par l'organisation ou par le client. Cet objectif peut être exprimé en pourcentage de produits défaillants au bout d'une période de temps spécifique (par exemple, une garantie) et/ou de périodes multiples. L'objectif peut également être exprimé en termes de garantie et/ou de coûts de maintenance. Dans certains cas, il y a lieu d'exprimer la fiabilité-cible en termes de durée moyenne de fonctionnement avant défaillance (MTTF) ou de temps moyen de fonctionnement entre défaillances (MTBF).

Quelle que soit la manière dont l'objectif est spécifié, il faut comprendre que la fiabilité-cible est liée à la manière dont l'entité va être utilisée et que le même "nombre" ou "mesure de fiabilité" a une signification différente pour différents profils d'utilisation (contraintes opérationnelles du lieu). En revanche, le MTTF ou MTBF de cette entité n'est qu'une valeur moyenne représentant les combinaisons de contraintes spécifiques. De ce fait, il convient que toute valeur de fiabilité revendiquée pour une entité donnée soit accompagnée d'une explication de l'usage prévu et du degré de sévérité relatif.

Lorsque deux contraintes ou plus sont appliquées à un produit qui comporte plusieurs composants, l'accélération d'essai est réalisée par augmentation de chaque contrainte individuelle en utilisant le modèle approprié pour ces contraintes. Dans ce cas, des taux de défaillance représentant chacun des mécanismes de défaillance sont accélérés individuellement et la fiabilité globale (R) ou la probabilité de défaillance (F) des composants

est à estimer de manière séparée. Ceci peut être exprimé pour une combinaison de n contraintes indépendantes sous la forme générale suivante:

$$R_{\text{Equipement}} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (34)$$

Pour la probabilité de défaillance:

$$F_{\text{Equipement}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \quad (35)$$

Le cas des risques concurrents est décrit dans l'Annexe G de la CEI 61649:2008.

Si une entité comprend m composants ou pièces élémentaires qui, à un moment quelconque, sont soumis(es) à un ensemble de n contraintes qui affectent tous les modes de défaillance simultanément, sa fiabilité au cours d'un segment de temps donné (partie du profil d'utilisation au cours de laquelle il existe une combinaison de contraintes spécifique), t_k est la suivante:

$$R_{\text{Entité}}(\text{Contrainte}, t_k) = \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(\text{Contrainte}_i, t_k) \right]_j \quad (36)$$

S'il y a w segments dans le profil d'utilisation total avec différentes combinaisons de contraintes, la fiabilité totale de cette entité pour une durée de vie ou autre période prédéterminée, t_0 , est la suivante:

$$R_{\text{Entité}}(\text{Contrainte}, t_0) = \prod_{k=1}^w \left\{ \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(\text{Contrainte}_i, t_k) \right]_j \right\} \quad (37)$$

où

$$t_0 = \sum_{k=1}^w t_k \quad (38)$$

Ces équations sont prudentes, c'est-à-dire qu'elles peuvent donner une sous-estimation importante de la fiabilité de l'équipement.

Le taux moyen de défaillance totale de cette entité est également fonction des contraintes appliquées et du profil d'utilisation; il peut être exprimé de la manière suivante:

$$\lambda_{a_Entité}(\text{Contrainte}, t_0) = - \frac{\ln[R_{\text{Entité}}(\text{Contrainte}, t_0)]}{t_0} \quad (39)$$

Pour toute autre condition de contrainte ou profil d'utilisation, le taux de défaillance moyen de l'entité sera différent.

Les exigences de fiabilité pour des entités réparables doivent être envisagées en terme de maintenance préventive prévue, ce qui veut dire qu'il convient d'examiner séparément la fiabilité des parties élémentaires de l'entité et qu'il convient que la durée pour laquelle les exigences sont élaborées corresponde à la période de maintenance prévue.

5.7.2 Démonstration de fiabilité ou essais de durée de vie

5.7.2.1 Types d'essais applicables

Dans la pratique, la plupart des essais peuvent être accélérés afin de raccourcir la durée d'essai. Certains des essais de fiabilité qui peuvent être accélérés sont les essais de démonstration, d'amélioration ou d'assurance de la fiabilité; ceux-ci peuvent être:

- des essais pour une proportion de succès, de durée fixe;
- des essais avec défaillances, de durée fixe;
- des essais jusqu'à défaillance (en général pour des composants ou de petits ensembles ainsi que des modes de défaillance individuels);
- des essais d'amélioration/croissance de la fiabilité, qui sont généralement préparés pour des périodes préétablies;
- des essais de taux de probabilité progressif (SPRT)

Les essais d'évaluation technique, qui sont généralement réalisés pour un mode de défaillance suspecté, peuvent également être accélérés à condition de disposer d'une certaine connaissance des facteurs d'accélération applicables aux entités d'essai concernées et des modes de défaillance prévus ou suspectés.

5.7.2.2 Essais de fiabilité d'un produit ou d'une entité – Modèle de cumul des dommages

Lorsqu'un programme d'essai de fiabilité est élaboré pour un profil d'utilisation spécifique, les résultats du programme d'essai sont valables seulement pour le profil d'utilisation spécifié. Si des estimations de fiabilité sont nécessaires pour d'autres profils d'utilisation du même produit, elles peuvent être obtenues par des essais supplémentaires ou en ajustant, par modélisation mathématique, les résultats d'essai au nouveau profil d'utilisation. Cette modélisation peut être effectuée lorsqu'il existe un rapport connu entre les contraintes et le profil d'utilisation appliqué à l'essai et le nouveau profil d'utilisation ajusté (voir la CEI 61709).

Lorsqu'il existe de nombreuses différences entre les deux profils d'utilisation, il y a plus de risques d'imprécision du modèle résultant de l'ajustement de l'estimation de la fiabilité au nouveau profil. Ces différences augmentent rapidement en fonction de la complexité du système évalué.

La fiabilité du produit et des composants en termes des contraintes opérationnelles et environnementales, en fonction d'une durée (durée de vie) préétablie t_0 , peut être exprimée de la manière suivante:

$$R(t_0) = R_U(t_0) \times \prod_i R_{S_i}(t_0) \times \prod_i R_{E_i}(t_0) \quad (40)$$

Dans l'équation ci-dessus, $R_E(t_0)$ représente la fiabilité de l'entité vis-à-vis des contraintes environnementales pendant la durée de temps t_0 , tandis que $R_S(t_0)$ représente la fiabilité vis-à-vis des contraintes opérationnelles. Le facteur $R_U(t_0)$ est utilisé pour représenter l'interaction ou la synergie inconnue entre les différentes contraintes environnementales et/ou opérationnelles, sachant que la détermination de la durée et de l'amplitude de chacune de ces contraintes suppose une indépendance des contraintes, alors que dans la plupart des cas, une telle supposition n'est pas valable.

L'Equation (40) peut être généralisée et exprimée de la manière suivante:

$$R_{Entité}(t_0) = \prod_{i=1}^{N_S} R_{Contrainte_i}(t_i) \quad (41)$$

Si $R_{Entité}(t_0)$ est l'objectif de fiabilité du produit ou l'exigence de fiabilité du produit qui est à démontrer lors d'un essai, il est possible d'attribuer une valeur de fiabilité à chacun des multiples dans l'expression de la fiabilité du produit. En la simplifiant à des fins d'illustration, la fiabilité attribuée peut être supposée identique.

$$\begin{aligned} R_{Entité}(t_0) &= (R_{Contrainte_i}(t_i))^{N_s} \\ R_{Contrainte_i}(t_i) &= \sqrt[N_s]{R_{Entité}(t_0)} \end{aligned} \quad (42)$$

Les valeurs de fiabilité attribuées concernant les contraintes individuelles diffèrent en fonction de l'utilisation prévue et du profil d'utilisation du produit ainsi que de sa sensibilité à un environnement particulier. Outre l'amplitude des contraintes prévues en utilisation réelle, la fiabilité du produit dépend de leurs effets cumulés. La durée de l'essai est ensuite calculée sur la base de la durée d'application de chacune des contraintes en utilisation réelle, tandis que l'accélération de l'essai est réalisée en augmentant l'amplitude de chacune des contraintes individuelles ou par accélération de leur durée.

Lorsque l'objet de l'essai est d'estimer la fiabilité sur le terrain, il convient d'utiliser un profil de contrainte d'utilisateur moyen. Ce profil peut être estimé pour des conditions climatiques données, comme par exemple l'Europe Centrale (voir la série CEI 60721). Il peut y avoir différentes contraintes dominantes ou extrêmes en fonction des lieux. Par exemple, dans certains pays tels que la Scandinavie du Nord, le Canada et la Russie, les basses températures peuvent être l'une des contraintes les plus élevées, tandis qu'au Nouveau Mexique, en Afrique et en Inde, il peut s'agir de températures élevées. A Singapour et au Japon, la contrainte la plus importante peut être l'humidité et à New Delhi il peut s'agir de la pollution de l'air. Concernant le mode d'utilisation, l'essai peut simuler un utilisateur moyen ou un utilisateur extrême (par exemple lorsque moins de 1 % des clients chargent fortement le produit). Il n'est pas conseillé de transférer un résultat d'essai d'un profil d'environnement, et d'utilisateur, à un autre. Par conséquent, de nombreuses entreprises complètent l'essai d'environnement par des essais de survie dont l'objectif est de déterminer si le produit survivra à quelques charges extrêmes dont il n'est pas prévu que la répétition soit assez fréquente pour affecter la fiabilité à long terme du produit. Ces essais d'environnement sont décrits dans la série CEI 60068.

Bien souvent, des produits sont soumis à des essais avec un cycle de contraintes destinées à exposer le produit à plusieurs contraintes combinées ou ordonnées en séquences. Idéalement, il convient d'appliquer les contraintes de manière combinée et intermittente afin de simuler le mieux possible les conditions sur le terrain. Cependant, dans la pratique, ceci est rarement possible. Pour utiliser le matériel d'essai de manière optimale et faciliter la localisation du type et du niveau de contrainte qui a généré la défaillance, on utilise souvent un cycle d'essai qui dure, par exemple, 1 semaine.

On suppose dans ce qui suit que l'entité est soumise à des essais pour chacune des contraintes prévues, opérationnelles et environnementales, en gardant à l'esprit leurs niveaux et leurs durées cumulées en utilisation réelle, ainsi que la période totale d'utilisation correspondante, t_0 .

Si la contrainte de dommages cumulés est proportionnelle à la durée d'une contrainte donnée, la fiabilité concernant chaque contrainte particulière peut être exprimée de la manière suivante:

$$R_i(k, \mu_{L_i}) = \Phi \left[\frac{k \times \mu_{L_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(a \times k \times \mu_{L_i})^2 + (b \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad (43)$$

où

- R_i est la fiabilité attribuée à l'entité pour ce qui concerne la contrainte spécifique au cours de sa durée d'application;
- k est le multiplicateur de la durée de contrainte réelle dans l'hypothèse des modèles de cumul des dommages;
- μL_i est la durée moyenne de l'application de cette charge (contrainte) en utilisation;
- a et b sont les multiplicateurs des valeurs moyennes de robustesse et de charge qui produiraient leurs écarts-types respectifs;
- Φ est le symbole de la loi de distribution normale cumulée.

En annulant les charges moyennes, l'Equation (43) est réduite au format ci-dessous:

$$R_i(k, \mu L_i) = \Phi \left[\frac{k-1}{\sqrt{(a \times k)^2 + b^2}} \right] \quad (44)$$

La Figure 7 présente la fiabilité tracée en fonction de k pour des valeurs données de a et de b .

Dans l'Equation (43), on suppose que chacune des contraintes peut être modélisée par une loi de distribution normale. Il convient de préférence d'utiliser les informations concernant la distribution précise (facteurs a et b). Si ces informations ne sont pas disponibles, on peut supposer que les écarts-types atteignent jusqu'à 10 % de la valeur moyenne. Après réduction, l'Equation (43) devient la suivante:

$$R_i(k) = \Phi \left[\frac{(k-1) \times 10}{\sqrt{k^2 + 1}} \right] \quad (45)$$

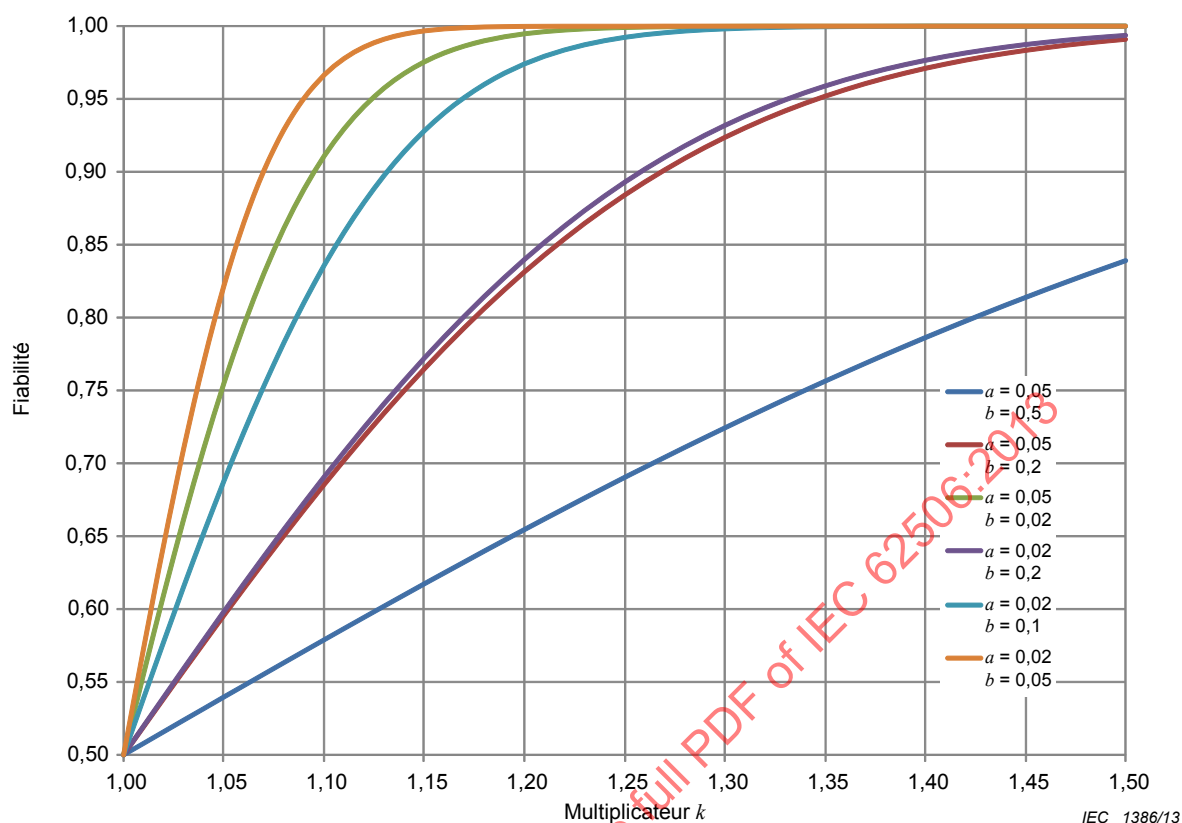
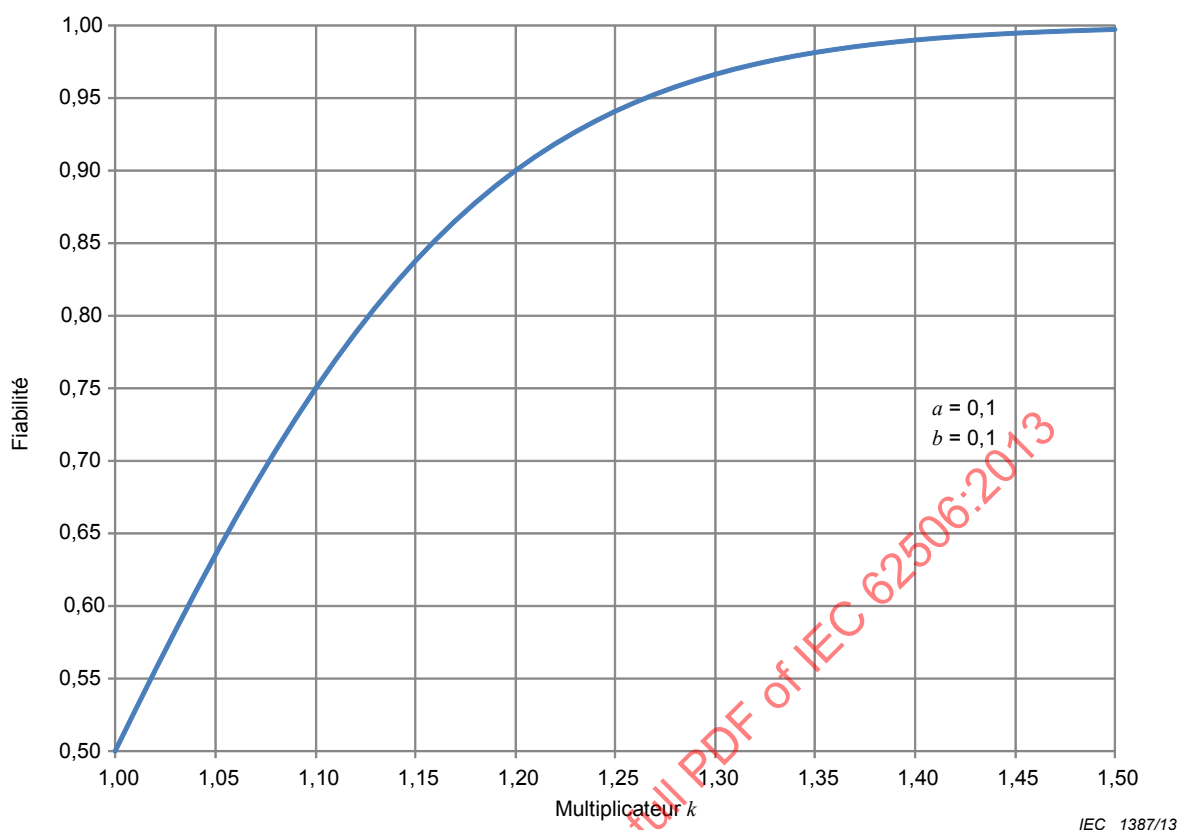


Figure 7 – Multiplicateur de la durée de contrainte d'essai pour les essais exigés de démonstration de fiabilité (de conformité) ou de croissance de la fiabilité

La Figure 8 présente un tracé spécifique pour des valeurs choisies de $a = 0,1$ et $b = 0,1$.



NOTE k est quelquefois appelé "rapport de durée de vie".

Figure 8 – Multiplicateur de durée d'application de la charge pour la fiabilité requise

La durée de chaque application de contrainte telle que déterminée ci-dessus donnerait une application de contrainte plus longue (d'environ 1,4 ou 1,5 fois) que l'application de la contrainte en utilisation. Pour que l'essai soit réalisable, les niveaux de contrainte sont alors accélérés en appliquant les facteurs d'accélération appropriés. Le type d'accélération des contraintes et les facteurs d'accélération spécifiques au produit pour les diverses contraintes prévues nécessitent d'être connus. Il est nécessaire de les obtenir en effectuant des essais jusqu'à défaillance à différents niveaux de contrainte pour les composants spécifiques (voir les Annexes F et G).

Le programme ci-dessus peut être élaboré de diverses manières:

- en tant qu'essai pour une proportion de succès, sans aucune défaillance;
- en tant qu'essai, avec un nombre admissible de défaillances;
- en tant qu'essai à durée fixe, mais sans exigence de fiabilité, ainsi, la fiabilité du produit sera estimée sur la base du nombre de défaillances au cours de l'essai;
- en tant qu'essai de croissance /amélioration de la fiabilité, fondé sur une hypothèse de taux de croissance.

Lorsqu'il s'agit d'un essai pour une proportion de succès, les résultats sont simples et faciles à interpréter. Lorsque l'essai est sans défaillance, il démontre l'exigence de fiabilité aux intervalles de confiance appliqués.

Si l'essai nécessite d'admettre un certain nombre de défaillances, il convient que la détermination de sa durée tienne compte du nombre de défaillances admissible. Il s'agit alors d'un essai "à nombre de défaillances fixe".

Si l'essai est un essai de croissance de la fiabilité, la durée totale de l'essai (ou l'effectif de l'échantillon pour tenir compte de la durée d'essai cumulée) est élaborée pour les différentes valeurs du nombre total de défaillances prévues en essai, r , en gardant à l'esprit la durée totale des contraintes appliquées, la confiance requise et la fiabilité démontrée exigée (voir la CEI 62429).

5.7.3 Essais de composants pour une mesure de la fiabilité

Les composants électroniques fabriqués en série sont soumis à des essais de contrainte accélérés afin de déterminer leur mesure de fiabilité (taux de défaillance ou autre) sous contrainte d'utilisation. Pour déterminer les facteurs d'accélération appropriés, les structures d'essai pour les nouvelles technologies de composants sont soumises à des essais à plusieurs niveaux de contrainte jusqu'à défaillance et les modes de défaillance appropriés, ainsi que les facteurs empiriques des modèles d'accélération, sont obtenus. La méthode de qualification est décrite dans le JESD47 [26]. Le choix des contraintes et de leurs niveaux est réalisé en fonction des modes de défaillance prévus des composants.

Les composants de plus grande taille, fabriqués en petites séries, peuvent souvent être soumis à des essais de fiabilité en utilisant des méthodes d'essais accélérés et des outils statistiques tels que définis dans la CEI 61649 ou la CEI 61124. On établit, sur la base du rapport des paramètres de la distribution particulière (c'est-à-dire les durées de vie caractéristiques dans la loi de Weibull), les facteurs d'accélération pour les contraintes particulières, qui sont ensuite utilisés pour prédire leur fiabilité à d'autres niveaux de contrainte du même type. Si plusieurs paramètres de distribution sont différents pour les différents niveaux d'une même contrainte, on peut s'attendre à ce que les caractéristiques physiques soient également modifiées. Par exemple, si la durée de vie caractéristique ainsi que le paramètre de forme de la loi de Weibull sont différents, pour des niveaux de contrainte différents, ceci peut indiquer que le niveau de contrainte était peut-être trop élevé et a modifié les caractéristiques physiques du composant concerné ou encore que le processus de fabrication était erroné. Si cela arrive dans les limites des capacités assignées du composant, ceci pourrait signifier qu'il faut réévaluer ces capacités.

Les environnements habituels d'essais de composants sont les suivants:

- la température;
- les vibrations;
- l'humidité;
- le cycle thermique;
- l'exposition à des sels.

Quelques exemples de contraintes opérationnelles sont

- la tension,
- l'intensité,
- l'effort,
- le frottement.

L'Annexe B donne un exemple d'essai accéléré d'un composant.

La durée de l'essai accéléré est pertinente pour la durée de vie estimée des composants. Ce sont les essais jusqu'à défaillance qui fournissent des résultats significatifs, tandis que les essais sans défaillance peuvent fournir des informations uniquement si l'essai approche la durée de vie d'un composant avec une marge donnée. La durée d'essai totale cumulée conventionnelle pour plusieurs composants (la durée d'essai totale est une somme de toutes les durées cumulées sur chaque composant) peut donner des résultats qui n'ont aucune valeur pour prédire la fiabilité au-delà de la durée d'essai réelle d'un composant unique. Par exemple, 32 000 km pour 100 pneumatiques avec zéro défaillance pourraient donner lieu à une conclusion erronée selon laquelle 36,8% des pneumatiques auraient une durée de vie de

3 490 000 km. En fait, le taux de défaillance calculé est uniquement valable pour les 32 000 km de l'essai. Il est cependant possible d'effectuer une estimation des taux de défaillance au-delà de la durée de l'essai grâce à une analyse de Weibayes, en supposant une pente Weibull connue (voir la CEI 61649).

Bien qu'évident pour l'exemple des pneumatiques, ce fait n'est pas tout à fait sûr pour d'autres composants. En général, les composants électroniques sont soumis à des essais par les fabricants pendant 1 000 h, sur 77 composants. Si cet essai est accéléré, il ne peut fournir des informations que pour la durée normalisée en niveau d'utilisation (équivalent de durée de vie). Le fait que les essais aient porté sur plusieurs composants n'améliore pas les résultats des essais, mais uniquement le degré de confiance (voir JESD47 et JESD85 [26],[28]).

5.7.4 Mesures de fiabilité pour des composants et des systèmes/entités

5.7.4.1 Composants électroniques

Pour les composants électroniques, la mesure de fiabilité préférentielle est le taux instantané de défaillance déterminé dans des conditions de profil normalisé (voir la CEI 61709).

Ceci permet de recalculer le taux instantané de défaillance pour les contraintes réelles du profil d'utilisation opérationnel du produit. Ces nouveaux calculs sont effectués en utilisant des modèles d'accélération appropriés (voir la CEI 61709).

Ces informations sont fournies pour une température et un environnement donnés, ainsi que d'autres contraintes spécifiées.

Le taux de défaillance déclaré est souvent le taux de défaillance moyen sur la durée de vie utile du composant, en supposant une durée exponentielle de fonctionnement avant défaillance. Cependant, certains composants électroniques et électromécaniques ont des durées de vie limitées (usure). Pour ces composants, il est nécessaire d'effectuer une estimation de la fin de la durée de vie utile. Les composants à durée de vie limitée sont par exemple: les transistors de puissance, les optocoupleurs, les DEL, les diodes laser, les condensateurs électrolytiques de type humide, les varistances, les ampoules électriques, les relais, les commutateurs, les connecteurs et les batteries (voir la CEI/TR 62380).

5.7.4.2 Composants mécaniques

Pour les composants mécaniques, la mesure de fiabilité préférentielle est le pourcentage de défaillances déterminé dans des conditions de profil normalisées. Cette mesure est souvent déclarée comme étant la durée de fonctionnement avec un pourcentage donné de défaillances, comme par exemple 10 % (souvent indiqué par la durée de vie B10 ou L10) ou 1 % de défaillances (souvent indiqué par la durée de vie B1 ou L1). En ce qui concerne la méthode d'estimation, voir la CEI 61649.

Ceci permet de recalculer la fiabilité pour les contraintes réelles du profil d'utilisation opérationnel du produit. Ces nouveaux calculs sont effectués en utilisant des modèles d'accélération appropriés.

Dans ce cas, le taux de défaillance est souvent calculé comme étant le taux de défaillance équivalent, calculé à partir de la probabilité estimée de survie et il est valable pour les contraintes spécifiées; cependant, ceci ne donne pas d'informations concernant la durée de vie prévue du composant.

5.7.4.3 Ensembles, systèmes (entités)

Pour ce qui concerne les entités plus complexes, constituées de composants (électriques et mécaniques, y compris les logiciels), la probabilité de défaillance serait exprimée par la probabilité de survie. Ces mesures permettent de combiner différentes lois de distribution des défaillances et sont appropriées lorsque des logiciels sont pris en compte.

5.8 Essais accélérés de conformité ou d'évaluation de la fiabilité

Les essais de conformité de la fiabilité, l'essai de taux de probabilité progressif, SPRT, et les essais à durée fixe sont conçus en se fondant sur l'hypothèse d'un taux de défaillance constant, sachant que la complexité des entités et leurs modes de défaillance ne pourraient accepter aucune autre loi de distribution, à moins que les essais ne soient utilisés pour déterminer la fiabilité de l'entité vis-à-vis de modes de défaillance individuels, ce qui est le cas pour des composants (pièces élémentaires).

Du fait de la fiabilité élevée (ou MTTF/MTBF) des produits, ces essais impliquent généralement des coûts ou des durées de réalisation prohibitifs et nécessitent donc d'être accélérés. La conception des essais étant la même pour les entités réparées ou remplacées et pour les entités non réparées, dans le présent paragraphe, le terme MTBF est utilisé pour lui-même et pour MTTF.

Il existe de nombreuses descriptions, des fonctions mathématiques d'ajustement, des courbes et des explications de ce type d'essai dans la documentation spécialisée; cependant, il y a peu d'éléments concernant les essais proprement dits, ce dont ils sont constitués, les contraintes à appliquer et leur justification. Sachant que la qualité de l'essai ne vaut que par les contraintes qu'il représente, la justification de la fiabilité de l'entité qui est à démontrer est identique à celle des essais à durée fixe présentés dans l'Equation (37), et la durée des contraintes appliquées (non accélérées) lors de l'essai nécessite d'être conforme à l'Equation (38).

Le taux de défaillance moyen doit être démontré par l'essai qui est déterminé à partir de l'équation de fiabilité appropriée. Sous sa forme la plus simple, et en supposant une loi de distribution exponentielle de la durée de fonctionnement avant défaillance, le taux de défaillance est le suivant:

$$\lambda_0 = -\frac{\ln[R(t_0)]}{t_0} \quad (46)$$

où

t_0 est la durée de fonctionnement prévue du produit.

Le taux de défaillance est ensuite accéléré en utilisant des facteurs d'accélération appropriés pour chacun des environnements appliqués et devient comme suit

$$\lambda_A = A_{Essai} \times \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \left(\prod_k A_k \right) \times \lambda_i \right) \quad (47)$$

où

λ_0 est le taux de défaillance de l'entité dans des conditions d'utilisation;

λ_A est le taux de défaillance de l'essai accéléré;

A_i est le facteur d'accélération pour chacune des contraintes augmentées de l'essai;

λ_i est le taux de défaillance de l'entité correspondant à la contrainte spécifique;

N_S est le nombre de contraintes.

Le facteur équivalent d'accélération d'essai total est alors (modèle d'accélération de Krasich pour un taux de défaillance constant [10]):

$$A_{Essai} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \left(\prod_k A_k \right) \cdot \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad (48)$$

$$A_{Essai} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A_i \cdot \left(\prod_k A_k \right) \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad (49)$$

L'inverse du taux de défaillance accéléré de l'Equation (46) donnera le MTBF, m_0 , qui peut être déterminé à partir des essais.

$$m_0 = \frac{1}{\lambda_a} = -\frac{t_0}{\ln(R_0(t_0))} \quad (50)$$

D'autres paramètres de SPRT et des essais à durée fixe sont ensuite appliqués selon la conception normale des essais SPRT (rapport de discrimination, risque du producteur et du consommateur, etc.).

La principale différence entre l'essai de conformité de la fiabilité accéléré et l'essai classique est la durée minimale de l'essai. La durée minimale de l'essai ne doit pas être plus courte que la durée d'essai minimale requise, déterminée pour l'essai accéléré qui, à son tour, est fonction de la fiabilité requise, des contraintes appliquées et de l'accélération d'essai. Par conséquent, l'effectif de l'échantillon doit être limité de façon à ce que la durée d'essai minimale, correspondant à un nombre de défaillances zéro sur la ligne d'acceptation, soit supérieure ou égale à la durée de l'essai accéléré minimale requise pour démontrer la fiabilité exigée.

Le SPRT est conçu de la même manière que l'essai non accéléré; les critères d'acceptation et de rejet sont définis, le plan d'essai est élaboré conformément aux risques acceptés du producteur et du consommateur et au rapport de discrimination, sauf en ce qui concerne le MTTF d'essai inférieur qui est l'inverse du taux de défaillance accéléré. L'autre exception est que les environnements sont accélérés et appliqués de la même manière que pour les essais à durée fixe.

L'Annexe B donne un exemple de SPRT accéléré.

5.9 Essais accélérés de croissance de fiabilité

Lorsque les essais de croissance de fiabilité sont accélérés, chacune des contraintes prévues au cours de la durée de vie du produit est accélérée en fonction des critères d'accélération. Les contraintes peuvent être appliquées individuellement et dans ce cas, il est préférable qu'elles soient réparties, par exemple au cours d'un cycle d'essai, de façon à simuler leur effet cumulé. La méthode préférentielle est d'appliquer autant de contraintes que possible simultanément, de manière à inclure leur éventuelle interaction.

La durée de chaque contrainte appliquée est établie de manière à représenter son application pendant la durée de vie réelle du produit, avec les marges nécessaires à la démonstration de la fiabilité (comme présenté dans les essais à durée fixe). La durée de fonctionnement avant défaillance est alors obtenue en multipliant la durée d'essai par le facteur d'accélération approprié. Lorsque les contraintes sont appliquées simultanément, il est important de déterminer la cause des défaillances de manière à pouvoir établir la durée appropriée de fonctionnement avant défaillance. Les temps de défaillance, recalculés pour le temps d'utilisation, sont ensuite rangés par ordre croissant et on applique l'une des méthodes d'analyse utilisées pour l'essai de croissance de fiabilité (voir CEI 61164).

Lorsque l'analyse est effectuée de cette manière, l'ordre d'application des contraintes ne biaise pas les résultats d'essai, puisque les défaillances sont recalculées en fonction de leur "instant réel" d'occurrence.

L'Annexe B donne des exemples d'accélération d'un essai de croissance de fiabilité et d'analyse des données. Principes directeurs des essais d'accélération.

5.10 Principes directeurs des essais accélérés

5.10.1 Essais accélérés pour des contraintes multiples et le profil d'utilisation connu

Lorsque les essais accélérés sont préparés pour les diverses combinaisons de multiples contraintes, il est important de simuler du mieux possible les conditions d'utilisation.

Les contraintes, à la fois environnementales et opérationnelles, ne sont pas en général appliquées comme en situation réelle, c'est-à-dire en diverses combinaisons dans chacune des séquences spécifiques. Les contraintes d'essai sont combinées lorsque cela est possible pour l'essai, mais également appliquées individuellement. Le cycle thermique et l'exposition thermique peuvent facilement être combinés en un seul essai, en ajoutant un cycle de fonctionnement, des variations de tension, la puissance acoustique appliquée, etc. Les essais de vibrations peuvent également être combinés au cycle thermique, mais la courte durée des vibrations par rapport au cycle thermique et à l'exposition thermique rend cette association techniquement difficile. Certains essais, tels que les chocs de nid de poule, le bruit acoustique, l'accumulation de poussière, les produits chimiques dangereux ou explosifs et les lubrifiants, sont très difficiles à associer à d'autres. Dans ce cas, les expositions environnementales sont réparties de façon à ce qu'elles puissent générer des dommages cumulés en séquence. En général, ceci est obtenu en divisant la durée de certains essais en deux, voire trois segments et même en modifiant l'ordre entre les expositions.

5.10.2 Niveau de contraintes accélérées

En règle générale, il convient que les niveaux de contraintes accélérées ne dépassent pas les niveaux auxquels les caractéristiques physiques ou chimiques de l'entité en essai pourraient être modifiées.

Pour certains essais, lorsque le but est de comprendre les limites des contraintes du produit, cette recommandation ne s'applique pas. Il n'est cependant pas recommandé de lier les résultats de ces essais à une valeur de démonstration de la fiabilité, du fait des imprécisions de tout modèle d'accélération au-delà des hypothèses inhérentes. Des exemples de ces essais sont les essais sous contrainte échelonnée ou les essais de sensibilité aux modes de défaillance.

5.10.3 Essais accélérés de fiabilité et de vérification

On confond souvent les essais de performance des entités avec certains essais accélérés de démonstration de la fiabilité. Il n'est pas rare qu'un client soumette les procédures correspondantes en même temps que ses exigences de fiabilité. Certains prétendent même que si les essais exigés sont effectués, les exigences de fiabilité seraient satisfaites.

Les essais de vérification sont destinés à vérifier l'aptitude d'une entité à fonctionner conformément aux conditions environnementales extrêmes spécifiées, avec une durabilité et une fiabilité appropriées. S'il est requis un essai spécifique de démonstration de la fiabilité, nécessitant un jeu d'essais, de longueur et d'effectif d'échantillon particuliers, il ne représente généralement pas un véritable essai de fiabilité et aucune fiabilité démontrée ne peut être revendiquée en cas de réussite de cet essai (sans défaillance). Même si ces essais peuvent représenter une certaine durée de vie, aucune corrélation ne peut être faite entre la vérification des performances et la fiabilité du produit.

La réalisation des essais de validation prouve que l'entité est conforme aux spécifications de conception en ce qui concerne son fonctionnement lorsqu'elle est soumise aux contraintes

extrêmes indiquées. En général, l'effectif de l'échantillon ne convient pas à une quelconque démonstration de la fiabilité ou de la robustesse vis-à-vis des variations de fabrication, et le fait que les petits échantillons d'entités soient soumis à des séquences d'essais limitées ne permet aucune revendication quant à leur fiabilité pour toutes les contraintes qu'ils sont susceptibles de subir en cours d'utilisation.

6 Stratégie d'essais accélérés pour le développement du produit

6.1 Plan d'échantillonnage d'essais accélérés

Pour un essai accéléré qualitatif (essai de Type A), l'effectif de l'échantillon est déterminé par le nombre de contraintes et le nombre de modes de défaillance identifiés. Il peut être nécessaire de retirer l'entité de l'essai soit parce que la limite de destruction a été trouvée, soit parce que l'entité est nécessaire pour une analyse (du mode) de défaillance. Dans certains cas, l'entité peut être réparée et l'essai poursuivi. Il convient par conséquent qu'un certain nombre de modules et de pièces de remplacement soient disponibles au cours de l'essai HALT. Il n'est cependant pas recommandé de considérer qu'une réparation est possible. Il convient donc de prévoir au moins un échantillon par type de contrainte. Pour un essai HALT conventionnel, ceci signifie qu'il faut un échantillon pour l'essai à basse température, un échantillon pour l'essai à température élevée, un échantillon pour l'essai de vibrations, un échantillon pour l'essai de cycle de température et un échantillon pour l'essai combiné de cycle de température et de vibrations. C'est-à-dire 5 échantillons au total. Pour tenir compte de la possibilité de plusieurs modes de défaillance, il est recommandé de prévoir 2 à 5 autres échantillons, de sorte que l'effectif total de l'échantillon recommandé est de 7 à 10 entités. Si le nombre d'entités n'est pas disponible, des réparations doivent être effectuées pendant l'essai.

Pour un essai accéléré quantitatif (essais de Types B et C), le nombre d'entités est principalement déterminé par l'objectif de l'essai: estimation du risque constant moyen (hypothèse d'une loi de distribution exponentielle des défaillances) ou estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance (durée de vie) des entités.

Dans le cas d'une distribution exponentielle, l'avantage est que la durée d'essai cumulée peut être rallongée en augmentant l'effectif de l'échantillon et la durée d'essai cumulée est calculée en multipliant l'effectif de l'échantillon par la durée d'essai. On suppose dans ce cas que soumettre une entité à un essai de 1 000 h donne le même résultat que soumettre 1 000 entités à un essai d'une heure chacune. De toute évidence, ce n'est pas le cas. Par conséquent, tant l'effectif de l'échantillon que la durée d'essai sont à choisir de manière à donner une image réaliste du mode de défaillance (durée en fonction des différents modes de défaillance) ainsi que les différences de robustesse d'une entité à l'autre (nombre d'échantillons d'essai). Un effectif d'échantillon type d'un essai accéléré de composant est de 77 échantillons pour 1 000 h (voir JESD 47B [26]). Dans le cas d'une distribution exponentielle, des normes de plans d'essai telles que la CEI 61123 et la CEI 61124 peuvent être utilisées. S'il est suspecté une faible distribution, il convient de choisir un effectif d'échantillon suffisamment important pour qu'il y ait dans l'essai une haute probabilité d'au moins une entité faible. La durée d'essai cumulée peut être multipliée par le facteur d'accélération estimé pour évaluer le nombre équivalent d'heures de fonctionnement sur le terrain. Le taux de défaillance moyen peut être estimé au moyen de la CEI 60605-6.

Dans le cas où l'objectif de l'essai est d'estimer la durée de fonctionnement avant défaillance (durée de vie), il est nécessaire que la durée d'essai soit suffisamment longue afin de disposer de suffisamment de temps pour estimer la durée de fonctionnement avant défaillance pour les différents modes de défaillance. Chaque mode de défaillance est à calculer séparément (voir la CEI 61649 et la CEI 61710). Pour un essai analysé à l'aide de la loi de Weibull, il convient de prévoir au moins 5 à 10 défaillances. Sachant qu'un essai de Weibull est souvent arrêté après défaillance d'un tiers des entités en essai, il convient de choisir un effectif d'échantillon de 15 à 30 entités. S'il est prévu plusieurs modes de défaillance, il convient de multiplier ces valeurs par les modes de défaillance prévus. S'il est suspecté une faible distribution, il convient de choisir un effectif d'échantillon suffisamment important pour qu'il y ait dans l'essai une haute probabilité d'au moins une entité faible. Par

exemple, s'il est suspecté une population faible de 5 %, il convient que l'effectif d'échantillon comporte au moins 30 entités. Pour réduire la durée d'essai et le nombre d'entités défaillantes (qui sont par exemple détruites) au cours de l'essai, il est possible d'utiliser l'essai de mort subite (voir la CEI 61649).

6.2 Discussion générale concernant les contraintes et durées d'essai

Les méthodes d'essai de la série CEI 60068 sont souvent utilisées. Ces normes préconisent différentes sévérités d'essai mais aucune recommandation quant à la sévérité à utiliser. La série CEI 60721 fournit cependant certaines lignes directrices.

Lorsque l'on compare les conditions d'un essai aux conditions sur le terrain, il est rare de pouvoir simuler les conditions sur le terrain, car elles varient en fonction de l'utilisateur, des conditions climatiques, etc. Il faut donc choisir des conditions représentatives ou les plus défavorables. Pour l'utilisateur, certains essais sont qualifiés par le terme "utilisateur sévère", c'est-à-dire un utilisateur défini de telle sorte que seul un petit pourcentage, par exemple 1 % des utilisateurs, utilise le produit dans des conditions de contraintes supérieures.

Lorsqu'il s'agit d'effectuer les essais de durée de vie, en utilisant par exemple les essais de type C, l'essai est en général étendu à un nombre plus important de cycles de charge ou à des durées plus longues que celles que le produit rencontrera sur le terrain, afin de tenir compte des variations de distribution des contraintes et de la robustesse et de garantir un niveau de confiance approprié de la fiabilité estimée. Ceci est appelé multiplicateur de la durée des contraintes ou rapport de durée de vie (voir 5.7.2.2 et l'Annexe B).

Sachant que les conditions d'utilisation varient d'un utilisateur à l'autre, en fonction de la géographie et du temps, les conditions d'essai sont à simplifier. Pour des raisons d'ordre pratique, les types de contraintes sont souvent appliqués séquentiellement et non simultanément. Si les types de contraintes sont appliqués à différents échantillons, l'essai ne détectera pas l'effet des interactions entre les types de contraintes. Il est par conséquent recommandé de combiner les contraintes dans toute la mesure du possible. Cependant, ceci exige en général un matériel d'essai plus complexe et plus onéreux. Lorsque les types de contraintes sont appliqués séquentiellement, il est important de combiner les contraintes aux cycles d'essais lorsque les différents types de contraintes sont appliqués séquentiellement, par exemple au cours d'une journée ou d'une semaine. Le cycle d'essai est ensuite répété autant de fois que nécessaire. De même, il faut souvent s'assurer que l'essai est reproductible. Ceci est important pour des laboratoires qui effectuent des essais d'homologation des équipements. L'essai de chute d'un produit en est un exemple. Si l'essai est effectué de façon à ce que le produit chute toujours selon le même angle, l'essai sera reproductible mais ne simulera pas les conditions de terrain, sachant que l'angle de chute du produit sera aléatoire.

6.3 Essais de composants soumis à des contraintes multiples

En général, les composants sont soumis aux essais séparément pour chaque type de contrainte (voir JESD47B) [26]. Cependant, dans certains cas, les essais sont combinés afin de vérifier l'effet combiné des contraintes. C'est par exemple le cas du pré-conditionnement de composants exposés à 3 fois un cycle thermique équivalent au profil de soudure. Même si le composant n'est pas soudé selon ce pré-conditionnement, le cycle de température affecte l'intérieur des composants de manière similaire au processus de soudure. Un autre exemple d'essai combiné est l'application d'un cycle thermique après un essai de niveau de sensibilité à l'humidité pour vérifier la propagation de la déstratification des composants (voir JEDEC JESD-A113 [23] et JEDEC STD A104-B [28]). Les essais de composants cibleront généralement un mode de défaillance spécifique afin de s'assurer que le mode de défaillance n'est pas présent dans le composant ou que la durée de fonctionnement avant défaillance est acceptable. Les essais de composants sont souvent réalisés sur des structures d'essai en lieu et place des composants en fonctionnement, afin d'économiser l'effort d'essai et de qualifier la technologie utilisée pour une famille de composants donnée. Pour des composants, il est recommandé d'appliquer les essais accélérés de types B et C, à moins que

l'essai ne soit réalisé dans le cadre d'une analyse des causes profondes, auquel cas des essais de type A peuvent être recommandés.

6.4 Essais accélérés d'ensembles

Les ensembles sont souvent soumis aux essais séparément pour chaque type de contrainte. Cependant, sachant qu'il y a plus de possibilités d'interactions dans un ensemble que dans un composant, les contraintes combinées sont plus importantes pour les ensembles. Les ensembles ont souvent des dimensions et un fonctionnement qui conviennent pour un essai HALT car ce type d'essai n'est généralement pas efficace avec des petites entités (composants) ou de grandes entités (systèmes). Pour les ensembles, il convient d'envisager des essais accélérés de Types A, B et C. De manière générale, la contrainte maximale applicable au cours d'un essai de type B ou C est déterminée par le composant le plus faible de l'ensemble.

6.5 Essais accélérés de systèmes

Les systèmes sont souvent soumis à des essais de contraintes combinées de Types B et C. En général, ces contraintes sont combinées au cours d'un cycle d'essai. Si les composants et ensembles ont été précédemment soumis à des essais, l'essai sur le niveau du système vérifiera principalement l'intégration des composants et des ensembles. De manière générale, le système comprendra également un logiciel intégré et il faudra en tenir compte lors de l'essai (voir la CEI 62429). Dans de nombreux cas, on suppose une distribution exponentielle de la durée de fonctionnement avant défaillance car l'effectif de l'échantillon est petit et idéalement, il convient qu'il n'y ait aucune défaillance ou seulement quelques défaillances au cours de l'essai. Habituellement, les essais de niveau du système sont utilisés pour vérifier la croissance de fiabilité (voir la CEI 61014, la CEI 61164 et la CEI 62303).

6.6 Analyses des résultats d'essais

Pour des essais accélérés qualitatifs (essais de Type A), le résultat donne les modes de défaillance et les conditions de contrainte dans lesquelles ils ont été observés. Une analyse approfondie de la défaillance est requise pour en déceler les causes profondes et estimer, par évaluation technique, la probabilité d'occurrence du mode de défaillance à des niveaux de contrainte plus faibles sur le terrain, compte tenu des variations de la robustesse et des distributions des contraintes (voir 5.1.1.2). L'objectif de l'essai HALT est d'identifier les quelques faiblesses d'un produit devant être améliorées pour que l'ensemble du produit soit suffisamment robuste. Les essais de type A ne donnent pas une estimation de la durée de vie ou du taux de défaillance du produit.

Pour des essais accélérés quantitatifs (de Types B et C), le facteur d'accélération est à estimer afin de corréliser la durée d'essai avec la durée équivalente sur le terrain. Chaque mode de défaillance est à analyser séparément. Une analyse des défaillances est donc nécessaire pour toutes les défaillances. Après estimation de chaque mode de défaillance observé, la probabilité de défaillance et la durée de fonctionnement avant défaillance peuvent être ajoutées pour estimer la probabilité de défaillance du produit dans le temps (voir 5.2.2.1). Les outils statistiques qui peuvent être utilisés pour analyse sont décrits dans la CEI 61123, la CEI 61124, la CEI 60605-6, la CEI 61649, la CEI 62303 et la CEI 62429.

7 Limites des méthodes d'essais accélérés

Les méthodes d'essais accélérés de fiabilité comportent plusieurs limitations majeures telles qu'énumérées dans la liste (non exhaustive) ci-après:

- La détermination des facteurs d'accélération est très complexe et prohibitive en termes de coûts et de temps. Ainsi, la durée des essais accélérés et les résultats de fiabilité (valeurs), qui dépendent des facteurs d'accélération, ont une précision limitée;
- Il peut être quelquefois très difficile d'effectuer des spéculations concernant les contraintes combinées qui contribuent à un mode de défaillance spécifique et dans quelle

mesure. Par conséquent, le facteur d'accélération pour des effets combinés peut également être sur ou sous-estimé;

- Les entités à soumettre aux essais peuvent être trop grandes ou trop onéreuses. Dans les deux cas, l'effectif de l'échantillon peut être limité pour que l'essai donne un niveau de confiance raisonnable;
- Le matériel d'essai, qui comprend un contrôle automatisé de l'essai, peut être trop complexe pour être abordable ou gérable;
- Certains moyens d'accélération des essais peuvent être inaccessibles du fait des masses thermiques importantes des entités soumises à l'essai ou du fait des valeurs assignées de contraintes limitées. Ainsi, l'essai peut devenir prohibitif en termes de temps et de coûts en raison de l'absence d'une accélération efficace;
- Dans les essais HALT, le nombre d'échantillons est souvent de un au maximum et peut ne pas être représentatif de la robustesse moyenne de l'ensemble des entités; de ce fait, les limites de destruction de calcul peuvent également être différentes et donner lieu à des conclusions erronées. Le cas inverse est également possible, lorsque l'unité d'essai peut avoir une robustesse supérieure aux valeurs moyennes;
- Lors d'essais de composants, les courbes sont généralement tracées sur la base des durées de fonctionnement avant défaillance, et sont utilisées pour déterminer l'accélération d'essai et pour obtenir des informations sur la fiabilité des composants. Lorsque les composants sont petits et ont subi des défaillances catastrophiques (s'ils ont brûlé ou si leurs caractéristiques physiques ont été fortement modifiées), il est souvent impossible de déterminer le mode de défaillance incriminé et par conséquent, les résultats peuvent être entachés d'erreurs de distribution et donner lieu à des informations de fiabilité erronées;
- Les essais accélérés d'entités donnent des informations concernant uniquement les contraintes et les combinaisons de contraintes qui ont été prises en compte pour la préparation des essais. Les résultats d'essai peuvent être inutilisables si le produit est utilisé de manière différente ou dans des environnements différents. Un nouvel essai sera nécessaire;
- Les résultats de la quantification de la fiabilité par accélération peuvent ne pas toujours être prédictifs sur un produit individuel du fait qu'il peut fonctionner à des niveaux de contrainte différents de ceux auxquels il a été soumis au cours des essais.

IECNORM.COM : Cible vietnamite will PDF of IEC 62506:2013