

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 210: Seismic qualification for metal enclosed and solid-insulation enclosed
switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to
and including 52 kV**

**Appareillage à haute tension –
Partie 210: Qualification sismique pour ensembles d'appareillage sous
enveloppe métallique pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures
ou égales à 52 kV**



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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 210: Seismic qualification for metal enclosed and solid-insulation enclosed
switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to
and including 52 kV**

**Appareillage à haute tension –
Partie 210: Qualification sismique pour ensembles d'appareillage sous
enveloppe métallique pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures
ou égales à 52 kV**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 29.130.10

ISBN 978-2-83220-615-7

**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.....	4
1 General.....	6
1.1 Scope.....	6
1.2 Normative references	6
2 Normal and special service conditions	7
3 Terms and definitions	7
4 Seismic qualification requirements	7
4.1 General.....	7
4.2 Preliminary analysis	7
4.2.1 Selection of the representative test sample	7
4.2.2 Mathematical model of the test sample	7
4.3 Severities	8
4.3.1 General	8
4.3.2 Severity level 1	8
4.3.3 Severity level 2.....	9
4.4 Acceptance classes.....	10
5 Qualification by test.....	10
5.1 General.....	10
5.2 Mounting	10
5.3 Test parameters	11
5.3.1 Measurements.....	11
5.3.2 Frequency range	11
5.3.3 Parameters for resonant frequency search	11
5.3.4 Parameters for time history test (seismic load test).....	11
5.4 Testing procedure	12
5.4.1 General	12
5.4.2 Inspection and functional checks	12
5.4.3 Resonant frequency search	12
5.4.4 Time history test (seismic load test).....	12
6 Qualification by combination of test and analysis.....	13
6.1 General.....	13
6.2 Numerical analysis	14
6.2.1 General	14
6.2.2 Static data (stiffness).....	14
6.2.3 Dynamic data	14
6.2.4 Numerical model.....	14
6.2.5 Computation methods.....	15
6.3 Analysis by experience or similarity.....	16
7 Evaluation of the seismic qualification	16
7.1 Validity criteria of the seismic test	16
7.2 Acceptance criteria of the test results	16
7.3 Criteria of model acceptance	17
7.4 Acceptance criteria of the numerical analysis results	17
7.5 Acceptance criteria of the analysis results by similarity	17
8 Documentation	17
8.1 Information for seismic qualification.....	17

8.2	Test report	17
8.3	Analysis report when analysis is a numerical analysis	18
8.4	Analysis report when analysis is performed by similarity.....	18
Annex A (normative) Characterization of the test sample for analysis		20
Annex B (informative) Criteria for seismic adequacy of enclosed switchgear and controlgear assemblies		21
Annex C (informative) Dynamic analysis methods		24
Annex D (informative) Expected peak ground accelerations for different earthquake scales		27
Annex E (informative) Qualification process flowchart.....		28
Bibliography.....		29
Figure 1 – Severity level 1 (horizontal) – Zero period acceleration (ZPA) = 0,5 g		9
Figure 2 – Severity level 2 (horizontal) – Zero period acceleration (ZPA) = 1 g		10
Table D.1 – Earthquake zones with earthquake intensity and magnitude scale		27

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 210: Seismic qualification for metal enclosed and solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV

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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- the subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

IEC 62271-210, which is a technical specification, has been prepared by subcommittee 17C: High-voltage switchgear and controlgear assemblies, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

The text of this technical specification is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
17C/515/DTS	17C/548/RVC

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

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

A list of all the parts in the IEC 62271 series, under the general title *High-voltage switchgear and controlgear*, can be found on the IEC website.

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

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 210: Seismic qualification for metal enclosed and solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 62271 applies to metal enclosed switchgear and controlgear assemblies complying with IEC 62271-200 for metal enclosed and IEC 62271-201 for solid-insulation enclosed, ground or floor mounted, intended to be used under seismic conditions.

The seismic qualification of the switchgear and controlgear assemblies takes into account any auxiliary and the control equipment mounted directly on the assembly.

It will specify seismic severity levels, acceptance levels, and give a choice of methods that may be applied to demonstrate the performance of high-voltage switchgear and controlgear assemblies for which seismic qualification is required.

The seismic qualification of the switchgear and controlgear assemblies is only performed upon request.

1.2 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 60068-2-6, *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)*

IEC 60068-2-57:1999, *Environmental testing – Part 2-57: Tests – Test Ff: Vibration – Time-history method*

IEC 60068-2-64, *Environmental testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, broadband random and guidance*

IEC 60068-3-3:1991, *Environmental testing – Part 3: Guidance – Seismic test methods for equipment*

IEC 62271-1:2007, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

IEC 62271-200, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 62271-201, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 201: AC insulation-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

ISO 2041, *Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary*

2 Normal and special service conditions

(void)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60068-3-3, IEC 62271-1, IEC 62271-200, IEC 62271-201 and ISO 2041 apply.

4 Seismic qualification requirements

4.1 General

The seismic qualification shall demonstrate the ability of the switchgear and controlgear assemblies to withstand seismic stresses.

Basis of seismic qualification is the test, because only that allows a verification of functionality of the equipment during and after the seismic events. The test is also a necessary input for setup of numerical model used for analysis.

A combination of test and analysis is needed because not each type of switchgear arrangement can be tested.

4.2 Preliminary analysis

4.2.1 Selection of the representative test sample

Due to practical reasons concerned with the available experimental facilities, the seismic qualification of switchgear and controlgear assemblies requires the choice of proper test samples which reasonably represent the whole system for the purpose of structural and functional checks.

Such test samples shall include the switching devices with their relevant operating mechanism and control equipment, and their electrical and mechanical interfaces.

These test samples shall demonstrate the worst cases, such as those with heaviest mass and highest centre of gravity. In case of functional units with different masses, the heaviest panel shall be placed at one end of the test arrangement. Simulation can be used to determine the test sample, which satisfies the above criteria.

4.2.2 Mathematical model of the test sample

If qualification by combined test and numerical analysis, according to Clause 6, is foreseen, a three-dimensional mathematical model of the test sample shall be created on the basis of technical information concerning the design characteristics.

Such a model shall take into consideration the presence of switching and control devices, compartments and of their supporting structures, and shall have sufficient sensitivity to describe the dynamic behaviour of the test sample in the frequency range being studied.

The validity of the model shall be established by comparison between simulation results and actual tests results, as stated in 7.3.

4.3 Severities

4.3.1 General

In earthquake zone 4 (risk of very strong earthquakes) the measured peak ground acceleration in many cases is approximately 0,5 g. In a few cases the measured peak ground acceleration is around 1 g (see also Annex D).

Due to the wide range of ground motions, site conditions, switchgear installations in buildings, two severity levels are defined for seismic qualification in order to avoid designing or testing always to the highest levels.

The shape of the Required Response Spectra (RRS) (severity levels 1 and 2) is a broadband response spectrum to cover many site conditions (magnitude, depth and distance to epicentre, rock or soft soil) and super elevation due to the floor level installation.

For qualification, one of the following severity levels shall be chosen:

The severity level 1 is recommended for peak ground / floor accelerations up to 0,5 g.

The severity level 2 is recommended for peak ground / floor accelerations up to 1,0 g.

The Required Response Spectra are given in Figures 1 and 2 for the different seismic qualification levels. The curves relate to 2 %, 5 % and 10 % damping ratio of the switchgear and controlgear assemblies. For testing and if the exact damping behaviour is unknown 5 % damping ratio is recommended.

Severity Level 1 is recommended for equipments mounted at the ground level for zones 0 to 4 or at upper floor levels combined with earthquake zones 0 to 3 (see Annex D). For Zone 0, it is not necessary to perform any seismic qualification.

Severity Level 2 is only recommended for equipments mounted at upper floor levels combined with earthquake zone 4 (see Annex D).

If site-specific conditions are known the user may develop a site-specific response spectrum which envelops the shape of the severity level 1 and/or severity level 2.

NOTE The severity level 1 is equivalent to the moderate performance level according to IEEE 693:2005.

The severity level 2 is equivalent to the high performance level according to IEEE 693:2005.

4.3.2 Severity level 1

The RRS is described by the following equations:

Horizontal spectral accelerations S_a (m/s²) for frequencies f (Hz):

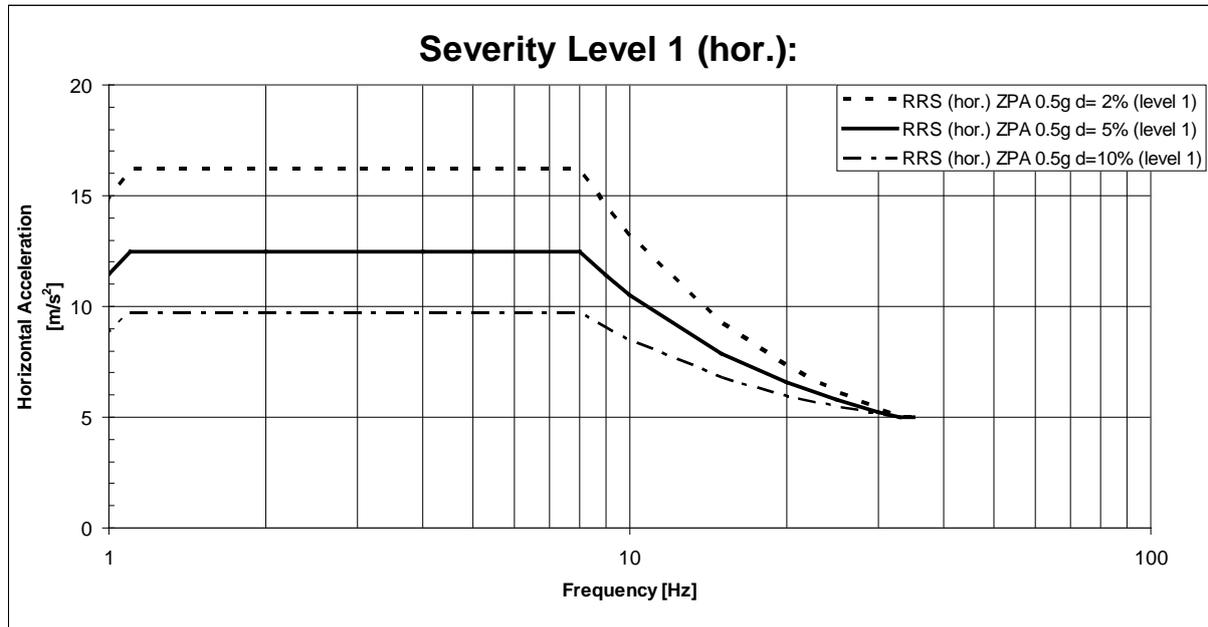
- $S_a = 1,144 \times \beta \times f \times g$ for $0,0 \leq f \leq 1,1$
- $S_a = 1,250 \times \beta \times g$ for $1,1 \leq f \leq 8,0$
- $S_a = 2 \times ((6,62 \times \beta - 2,64) / f - 0,2 \times \beta + 0,33) \times g$ for $8,0 \leq f \leq 33$
- $S_a = 0,5 \times g$ for $f \geq 33$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156$, where d is the percent damping (2, 5, 10 etc.) and $d \leq 20$ %.
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

For qualification the RRS is limited to a frequency range starting at 1,0 Hz (see 5.3.2).

For vertical spectral accelerations the conversion factor is 0,8.

NOTE The conversion factor is 0,8 in order to harmonize the values settle by IEEE and IEC standards.



IEC 245/13

SOURCE: Reproduced from IEEE Std 693:2005, *IEEE Recommended Practice For Seismic Design of Substations* with the permission of IEEE.

Figure 1 – Severity level 1 (horizontal) – Zero period acceleration (ZPA) = 0,5 g

4.3.3 Severity level 2

The RRS is described by the following equations:

Horizontal spectral accelerations S_a (m/s²) for frequencies f (Hz):

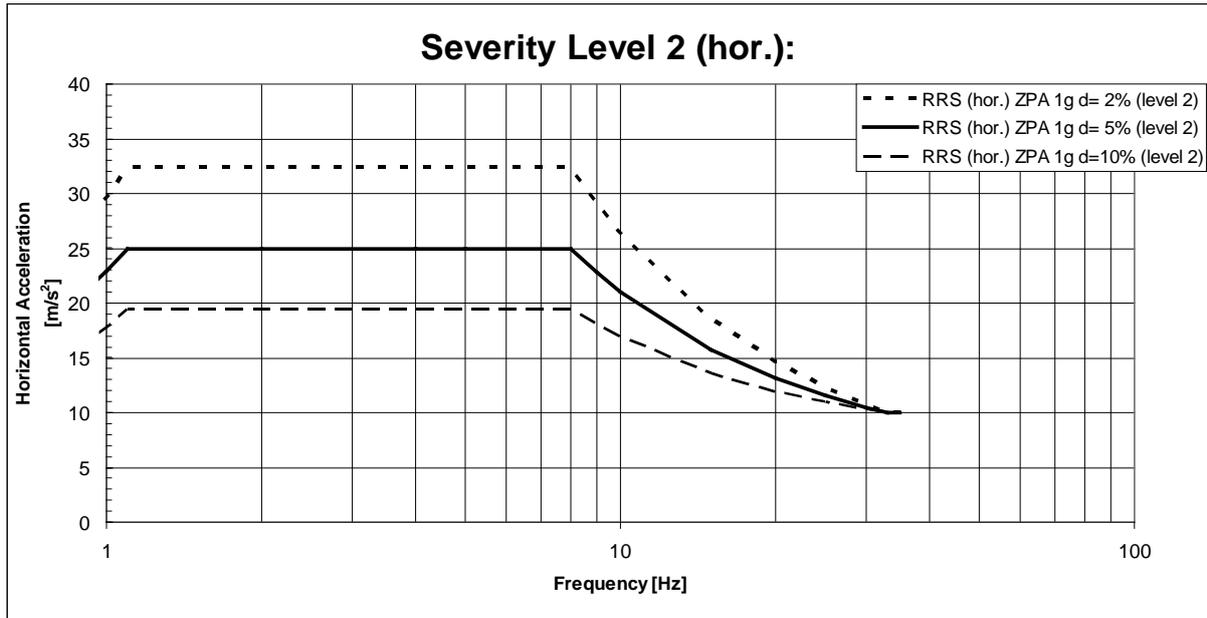
- $S_a = 2,288 \times \beta \times f \times g$ for $0,0 \leq f \leq 1,1$
- $S_a = 2,5 \times \beta \times g$ for $1,1 \leq f \leq 8,0$
- $S_a = 2 \times ((13,2 \times \beta - 5,28) / f - 0,4 \times \beta + 0,66) \times g$ for $8,0 \leq f \leq 33$
- $S_a = 1 \times g$ for $f \geq 33$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156$, where d is the percent damping (2, 5, 10 etc.) and $d \leq 20$ %.
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

For qualification the RRS is limited to a frequency range starting at 1,0 Hz (see 5.3.2).

For vertical spectral accelerations the conversion factor is 0,8.

NOTE The conversion factor is 0,8 in order to harmonize the values settle by IEEE and IEC standards.



IEC 246/13

SOURCE: Reproduced from IEEE Std 693:2005, *IEEE Recommended Practice For Seismic Design of Substations* with the permission of IEEE.

Figure 2 – Severity level 2 (horizontal) – Zero period acceleration (ZPA) = 1 g

4.4 Acceptance classes

Two acceptance classes for equipment are defined:

For class 1, the equipment has to maintain its functionality during and after the earthquake. After the seismic event maintenance and partial replacement might be necessary to ensure long term operation.

For class 2, the equipment has to maintain its functionality during and after the earthquake. After the seismic event no maintenance is required.

5 Qualification by test

5.1 General

The test procedure shall be in accordance with IEC 60068-3-3 with the modification that the time history test method in accordance with IEC 60068-2-57 shall be applied. The time history test method more closely simulates actual conditions, because the behaviour of the test sample is always not linear.

The seismic test should demonstrate the ability of the switchgear and controlgear assemblies to perform its required functions during and after seismic loads in form of Test Response Spectrum (TRS) that envelopes the RRS. The demonstration shall be performed as it is settled in 5.4.1 and 5.4.3.

If a test sample cannot be tested with its supporting structure (e.g., due to its size), the dynamic contribution of the structure shall be determined by analysis and accounted for in the test.

5.2 Mounting

The test sample shall be mounted as in service condition including dampers (if any).

If exact service conditions are unknown, a rigid base frame shall be used between the equipment and the shaking table.

The horizontal orientation of the test sample shall be in the direction of excitation acting along its two main orthogonal axes.

Any fixtures or connections required only for testing shall not affect the dynamic behaviour of the test sample.

The method of mounting of the test sample shall be documented and shall include a description of any interposing fixtures and connections (see IEC 60068-2-47).

5.3 Test parameters

5.3.1 Measurements

The measurements should be in accordance with 5.2 of IEC 60068-3-3:1991.

At least the following signals shall be recorded:

- acceleration at the shake-table;
- acceleration at significant places within the test object:
 - at least one measurement point, directly connected to the main structure (usually on top of switchgear),
 - near to the centre of gravity (if accessible),
 - at critical components (e.g. heavy masses).

5.3.2 Frequency range

The frequency range shall be from 1 Hz to at least 35 Hz in accordance with the Annex B of IEC 60068-2-57:1999 because in earthquakes the predominant frequencies are in between this range. The frequency range is applied to the resonant frequency search test and the generation of artificial earthquake wave.

The first resonant frequency for a typical test setup in horizontal directions is in the range of 5 Hz to 10 Hz, therefore test frequencies below 1 Hz are not relevant.

Due to the limitation of some shake-tables it is not required to envelop the RRS below frequencies of 70 % of the lowest resonant frequency of the equipment.

5.3.3 Parameters for resonant frequency search

The resonant frequency search test shall be carried out according to 10.1 of IEC 60068-3-3:1991.

The recommended acceleration during the resonant frequency search is 0,1 g. The search shall be conducted successively by sine sweeps in the three main axes at a maximum rate of 1 octave/min.

5.3.4 Parameters for time history test (seismic load test)

The test directions shall be chosen according to IEC 60068-3-3:1991, Clause 15.

Tri-axial testing is recommended.

The severity level shall be chosen according to 4.3.

The total duration of the time-history shall be 30 s at least and the strong part duration shall be not less than 20 s.

5.4 Testing procedure

5.4.1 General

The test sequence shall be as follows:

- functional checks before testing;
- resonant frequency search (required to determine critical frequencies and damping ratios and/or for analysis);
- time-history test (seismic load test);
- resonant-frequency search;
- functional checks after testing.

5.4.2 Inspection and functional checks

Before and after the tests, the following operating characteristics or settings shall be recorded or evaluated (when applicable) at the rated supply voltage and operating pressure:

- a) visual inspection;
- b) operation of any switching device;
- c) closing time of any fast-closing switching device;
- d) opening time of any fast-opening switching device;
- e) operation of any withdrawable or removable part;
- f) gas and/or liquid tightness where relevant;
- g) resistance measurement of the main circuit;
- h) power-frequency withstand voltage test as condition check of the main circuit (all switching devices in closed position) phase to phase and phase to earth, according 6.2.11 of IEC 62271-1:2007;
- i) power-frequency withstand voltage test as condition check of the switching devices in opened position, according 6.2.11 of IEC 62271-1:2007.

These functional tests can be performed at the laboratory of the manufacturer.

5.4.3 Resonant frequency search

The resonant frequency search test shall be carried out according to 10.1 of IEC 60068-3-3:1991.

5.4.4 Time history test (seismic load test)

The time history test shall be performed once according to IEC 60068-2-57 with the parameters as defined in 5.3.4.

During the seismic test the following parameters shall be recorded in addition to 5.3.1:

- electrical continuity of the main circuit (if applicable);
- electrical continuity of the auxiliary and control circuit (representative NO/NC contacts).

During the test the control circuits shall be energized at the rated voltage.

One test run is required, at the beginning all switching devices shall be in closed position; the test condition depends on the switching devices and their ability to perform operations during the strong motion part of the time history:

- during this operational test each circuit-breaker shall perform at least one operating sequence (recommendation: O-5s-C-5s-O within the middle of total test duration and therefore within the strong part of motion);
- other switching devices shall operate as specified (e.g. open operation for load break switches);
- switching devices unable to operate during seismic loads shall perform the test in closed position without operation.

NOTE 1 Circuit-breakers ensure the switching capability even during seismic events. Other switching devices give evidence only for the functionality specified by the manufacturer.

NOTE 2 A further test run can be performed optionally, with all switching devices in closed position without operation. This leads to a qualification valid for this standard and for the IEEE 693.

Criteria for assessing the test validity and the test results are provided in 7.1 and 7.2.

If the test is intended to be used as a basis for numerical analysis, then further recordings shall be performed in order to provide relevant data. Further test parameters are:

- deflection of components where significant displacements are expected;
- strains on critical elements (e.g. bushings, flanges, enclosures and support structures);
- acceleration on relevant locations on the test sample.

6 Qualification by combination of test and analysis

6.1 General

Analysis alone cannot be applied because metal-enclosed switchgear and controlgear assemblies are complex devices and functional operability can not be verified by analysis techniques alone.

Analysis may be used:

- in validating switchgear and controlgear assemblies already tested in the same configuration under different seismic conditions;
- in validating switchgear and controlgear assemblies similar to the ones already tested under the same seismic conditions but which include modifications influencing the dynamic behaviour (e.g. change in the arrangement of the switchgear and controlgear assemblies, or in the mass of components);
- in validating switchgear and controlgear assemblies which cannot be qualified by testing alone (e.g. because of their size and/or complexity).

The methodology comprises the analysis of the structural part and the testing of the functionality separately.

The structural part consists principally of the structure including braces, frames, struts and attachments that transmit all seismic loads between the equipment and the floor. The dynamic behaviour of the equipment or assembly depends on the structural part.

Two or more assemblies can be considered structurally similar when they have the same structural scheme and the same connections types; they can be different by the mass distribution and/or the dimensions.

The functional part consists of components which are considered as logical sub-grouping of equipment functions typically organized and arranged as physical devices, modules or subassemblies that can be detached from the equipment and can be mounted to a test fixture using the same mechanical and electrical interfaces and tested as standalone units.

Two methods may be used to perform the mechanical validation:

- numerical analysis,
- analysis based on similarity.

6.2 Numerical analysis

6.2.1 General

Numerical analysis shall only be used to demonstrate the structural integrity. Additional accelerations at the fixing points of equipment may be calculated.

The functional operability shall be demonstrated from experience data (see 6.3).

Numerical analysis is performed with a numerical model which shall be calibrated by using static and / or dynamic data following the numerical method adopted (see Annex C).

6.2.2 Static data (stiffness)

The stiffness of the structure in horizontal direction could be obtained by applying a static force at the top of it.

If the structure is not axial-symmetric, at least two different orthogonal static forces shall be required.

6.2.3 Dynamic data

Dynamic data (damping ratios, critical frequencies, modal shapes, responses in acceleration on different points of the structure) for numerical analysis shall be obtained by a dynamic test of a similar test sample (see Annex A).

If during the test a nonlinear behaviour of the structure is detected, the analysis shall be reassessed taking into account the test results by using equivalent elastic stiffness and damping.

NOTE The nonlinearity is mainly on the damping, which can be quite different and higher than that measured at low levels, and on the stiffness, which can change with increasing loads, and consequently can change the resonant frequencies.

6.2.4 Numerical model

The general procedure is as follows:

- a) set up of the finite element (FE) model by identifying the parts which act as structure (and therefore shall be modelled using structural FE) and the parts which act as masses (and therefore can be modelled using inertial FE);
- b) calibration of the FE model by using experimental data in 6.2.2 and / or in 6.2.3 according to the computed method used;
- c) considering the modularity of switchgear and controlgear assemblies, the numerical model calibrated for the test sample can be extended to a complete set of assemblies, all having the similar structure;
- d) determination of the response, in the frequency range stated in 5.3.2, using the methods described in the following subclauses (see 6.2.5);

- e) conclusion on the seismic mechanical behaviour according to the acceptance criteria given in subclause 7.4.

6.2.5 Computation methods

6.2.5.1 Static coefficient analysis

This method is based on the assumption that the complete assembly is subjected to the same acceleration. It allows a simpler technique to estimate the structural integrity with higher conservatism.

It should be used only when the accelerations on the components or on their anchorage points are expected to be equal or lower in comparison with the corresponding measured values on the tested assembly.

If the first natural frequency is unknown, the acceleration to take into account shall be the peak of the required response spectrum at a damping of 5 % (in case of unknown damping value).

If the first natural frequency is known, the acceleration to take into account shall be the spectral acceleration at this frequency and for a damping of 5 % (in case of unknown damping value).

In the both cases a coefficient of 1,5 shall be applied to take into account the effect of higher frequency modes.

Therefore, the seismic forces on each component of the switchgear and controlgear assemblies are obtained by multiplying the values of its mass, concentrated at its centre of gravity, by this acceleration.

6.2.5.2 Response spectrum dynamic analysis

For equipment having the first natural frequency below 35 Hz, the response spectrum dynamic analysis is recommended.

In comparison with the static coefficient analysis (see 6.2.5.1), this method allows the computation of the distribution of the maximal acceleration on the assembly.

In comparison with the time history analysis (see 6.2.5.3), this method allows to use directly the required response spectrum.

The response of interest, deflection, stress or acceleration, is determined by combining each modal response considering all significant modes (see Annex C for recommended combination procedure).

6.2.5.3 Time history dynamic analysis

Time history dynamic analysis is the most careful dynamic computation technique, involving time-step simulation of dynamic phenomena. It is based on a proper definition of the time histories which shall comply with the required response spectrum. In this case, the method can give the most detailed results. But it is not recommended because for the seismic qualification these levels of detail are not necessary.

The procedure of the time history dynamic analysis is described in Annex C.

6.3 Analysis by experience or similarity

In addition to the numerical analysis, analysis by experience may be another way to achieve the seismic qualification. It requires data from equipments of similar design that has successfully operated under previous qualification tests.

Each structural modification, which proves that the stiffness is not deteriorated, is acceptable. In these conditions, analysis by experience has to demonstrate that modifications do not generate stresses higher than obtained during the qualification test on the similar equipment.

For example: a mass moved from the top to the bottom produces a decrease of the bending moment on the anchorage points of the base.

If there is equivalence between the components to be qualified and the components previously tested the functionality shall be demonstrated. This means there is a high degree of similarity of the components and the local severity on the component shall be equal or less severe than this encountered during the qualification tests.

If there is no equivalence or in case of new components, the functionality shall be demonstrated with dynamic tests representative of the local environmental conditions and severity on the component.

7 Evaluation of the seismic qualification

7.1 Validity criteria of the seismic test

The seismic simulation waveform shall produce a test response spectrum which envelopes the required response spectrum (calculated at the same damping ratio) and have a peak acceleration equal to or greater than the zero period acceleration. Details on the validity criteria for the seismic tests are given in IEC 60068-2-57.

7.2 Acceptance criteria of the test results

For acceptance class 1, it shall be checked that:

- a) the dielectric strength, switching capability and current carrying capability of the switchgear shall not be impaired, evidence is given by comparison of the functional check recordings before and after the test (according to 5.4.1). No significant change shall occur; all measured values shall be within the relevant tolerances given by the manufacturer;
- b) during a seismic test run without mechanical operation of switching devices the main contacts shall remain in open or closed position;
- c) during a seismic test run with mechanical operation of switching devices the main contacts shall reach the intended positions;
- d) during the seismic test, chatter of relays shall not cause the switching devices to operate.

For acceptance class 2, all the acceptance criteria of class 1 have to be fulfilled plus the following criteria:

- the resonant frequencies shall not change by more than 20 % after the test;
- cracks on main parts are not acceptable (e.g. primary structural elements and insulating parts);
- deformations are allowed as long as the long term functionality is not affected;
- the condition of fixing devices of the equipment shall be maintained;
- any withdrawable or removable part shall operate correctly;
- auxiliary and control circuits shall not provide wrong information of the status of the switchgear and controlgear assemblies (position, alarm signals).

NOTE 1 Normally, chatter less than 2 ms is considered to be acceptable.

NOTE 2 Resetting of monitoring equipment is considered to be acceptable if the overall performance of the switchgear and controlgear assemblies is not affected.

7.3 Criteria of model acceptance

The model is considered consistent if the calculated accelerations of the devices which are part of the assembly are equal to or greater than the measured values during the test.

Natural frequencies and vibration modes shall be compared in order to verify the consistency of the model.

7.4 Acceptance criteria of the numerical analysis results

When a material is ductile, the Von Mises equivalent stresses of each component shall not exceed 100 % of yield strength of the material.

When a material is brittle, the Von Mises equivalent stresses shall not exceed 100 % of the minimal stress guaranteed in flexion.

NOTE 1 A material is ductile if it experiences a considerable plastic deformation before fracture.

NOTE 2 A material is brittle if it experiences a limited or no plastic deformation before fracture.

7.5 Acceptance criteria of the analysis results by similarity

The expected mechanical stresses on the equipment to be qualified shall be equal to or smaller than the stresses, in the same points, previously measured on a similar successfully tested equipment.

8 Documentation

8.1 Information for seismic qualification

The following information is required for either analysis or testing of the switchgear and controlgear assemblies:

- a) severity level (see 4.3);
- b) acceptance class (see 4.4);
- c) details of structure and mounting (see 5.1 and 5.2);
- d) number and relative position of testing axes (see 5.2).

8.2 Test report

The test report shall contain the following items:

- a) severity:
 - severity level;
 - acceptance class;
- b) switchgear and controlgear assemblies identification file including structure and mounting details:
 - one drawing of the complete test objects including weights, centre of gravity and measuring points;
- c) test facility:
 - location;
 - test equipment description and calibration;

- d) test method and procedures:
 - number and relative position of testing axes;
 - number and conditions of test runs;
- e) test data including functional data:
 - resonant frequencies and damping, including records of the resonant frequency search;
 - response spectra including comparison of RRS and TRS for each axis;
 - time histories of the test for each axis;
 - list of any anomalies, documentation of any marks for distress respectively damage;
 - data of the functional checks, measured before and after the test including comparison;
 - some diagrams of the contact supervision during the time-history test;
 - photos of test set-up and measuring points;
- f) results and conclusions.

The cover sheet of the test report shall contain at least the following information:

- type and designation of test object;
- severity level;
- acceptance class;
- number and conditions of test runs.

8.3 Analysis report when analysis is a numerical analysis

The report shall include the following:

- a) identification and description of equipment to be qualified;
- b) switchgear seismic test references and relevant test data;
- c) justification of the choice of the computation method;
- d) identification of the computer software and validation references;
- e) model description (type of elements, size of meshing, assumptions,...);
- f) list of natural frequency modes in the 1 Hz to 35 Hz range (except for static method);
- g) model validity and justification statement;
- h) equipment response for the Required Response Spectra (RRS) specified;
- i) mounting-reaction forces;
- j) calculated deflections of connections, attachments and clearances;
- k) performance of each device, component, and accessory in terms of mechanical behaviour and operability under seismic conditions;
- l) results, conclusions, and qualification statement;
- m) signatures (as required) and date.

8.4 Analysis report when analysis is performed by similarity

The report shall include the following:

- a) identification and description of equipment to be qualified;
- b) identification and description of reference equipment;
- c) justification of the similarity;
- d) comparison of the equipment to be qualified versus reference equipment: stiffness, dimensions, arrangement, mass distribution, seismic severity;

- e) performance of each device, component, and accessory in terms of mechanical behaviour and operability under seismic conditions;
- f) results, conclusions, and qualification statement;
- g) signatures (as required) and date.

Annex A (normative)

Characterization of the test sample for analysis

A.1 Low-level excitation

A.1.1 General

The method exploits the application of a low-level excitation of the test sample for the determination of its natural response.

A.1.2 Test method

There are different test methods:

- resonance search with a slowly swept sinusoidal vibration test according to IEC 60068-2-6, See ISO 7626-2.

NOTE When portable exciter is used, experimenters pay attention to the influence of the weight of portable exciters. With the test sample mounted to simulate the recommended service mounting conditions, a number of portable exciters are attached at the points on the test sample which will best excite its various modes of vibration.

- measurement of the transfer functions at critical points of the structure by using an impact test,
See ISO 7626-5.
- measurement of response at critical points of the structure by using a broadband random input signal according to IEC 60068-2-64.

The data obtained from the monitoring instruments placed on the test sample are used to analyse its dynamic performance.

A.1.3 Analysis

The frequency responses obtained from the test are used to determine the modal frequencies and damping ratios which shall be used in the numerical analysis of the test sample stated in 6.2.

A.2 (Void)

Annex B (informative)

Criteria for seismic adequacy of enclosed switchgear and controlgear assemblies

B.1 General

B.1.1 Combination of stresses

The probability of an earthquake of the recommended seismic qualification level occurring during the life-time of the switchgear and controlgear assemblies is low, whilst the maximum seismic load in a natural earthquake would only occur if the switchgear and controlgear assemblies were excited at their critical frequencies with maximum acceleration. As this will last only a few seconds, a combination of the utmost electrical and environmental service loads leads to unrealistic conservatism.

The following loads may be considered to occur additionally, if not otherwise specified:

- rated internal pressure;
- permanent loads (dead loads);
- thermal effects.

The combination of loads should be effected by static analysis, applying the forces in the direction they occur.

B.1.2 Floor and building structure interaction

Floor and building structure interaction may be described if it is desirable to calculate the effect of their presence. Measures that may be taken to minimize floor and building structure interaction are as follows:

- lower centre of gravity of equipment;
- lightweight equipment;
- use of monolithic floors or buildings meeting seismic requirements.

B.1.3 Displacement limitations

Considerations that impose displacement limitations on equipment may be described as follows:

- alignment of moving parts;
- leakage of insulating gas;
- impact with adjacent equipment;
- reduction of dielectric spacing and damage to insulation;
- interconnection to equipment on adjoining floors.

B.2 Recommended installation provisions and practices

B.2.1 Floors

It is recommended that, as far as possible, all interconnected equipment be placed on a monolithic floor to reduce differential movements due to the design earthquake. When

interconnected equipment is not located on the same floor, then the expected differential motions between equipment due to floor motion should be considered.

Consideration may be given to interaction on underground conduits entering and leaving through the floors. If equipment is rigidly coupled to structural elements, such as walls or adjacent floors, the element response and relative motion may be taken into account.

B.2.2 Methods for anchoring equipment to foundations

It is strongly recommended that large equipment and equipment with large dimensions between anchor locations be anchored to steel members embedded in and firmly attached to structural elements in the concrete. Location and type of fixings may be shown on the manufacturer's drawing. All fixings shall be adequate for forces coming from a design earthquake. Exposed metal fixings shall be protected from corrosion.

If bolts are used to anchor equipment, they shall be either cast in fresh concrete or fixed by means of well-tested chemical anchors for drilled holes in hardened concrete. The use of bolts or anchors that are placed in holes drilled in hardened concrete is not recommended. Bolts of mild, ductile steel are preferred.

Consideration may be given to any unequal distribution of dynamic earthquake loading on the anchor bolts (due to bolt hole tolerance, torque load or non-contact of nut). The torque value to which the anchor bolts are tightened, their size and location, shall be shown on the construction drawings. In addition, the strength and material specifications shall be provided.

All anchor systems shall be designed to accommodate torsion, shear and bending and axial loads and any combination thereof that is experienced during the design earthquake. Shear and tensile strength of that portion of the anchor system within the foundation may be greater than the strength of the bolt attaching to the equipment.

NOTE See [1].¹

B.2.3 Interconnection to adjacent equipment

All interconnections between structures shall be adequate to accommodate all large relative motions.

Structurally and dynamically dissimilar structures may experience large relative displacements. Leads and interconnections shall be long and flexible enough to allow these displacements to occur without causing damage. Particular attention shall be paid to brittle non-ductile parts such as ceramic bushings and insulators. In no circumstances shall electrical or structural interconnections abruptly stiffen leading to increased motion and strain. Such nonlinearities develop large impact forces. Consideration shall be given to the resultant change in dynamic characteristics of the equipment as a result of any being used to make interconnections between equipment.

B.2.4 Use of bracings on switchgear structure

Stiffening the equipment may increase some of its natural frequencies, raising them out of the critical range of earthquake energy. Diagonal cross-bracing and axial load-carrying members can be used to stiffen or strengthen equipment. Where bracing is employed, particular attention should be paid to the following aspects:

- bolted joints are recommended throughout the structure so as to increase the effective damping at high force levels;

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

- information concerning the correct torque for all bolts shall be supplied, thus ensuring the assemblies will behave dynamically as intended;
- if part of the structure is to be supplied by the user, then the manufacturer or user, or both, shall supply the necessary information so that the static and dynamic characteristics and foundation requirements can be easily determined.

The following basic requirements on the bracing should be taken into account:

- the bracing shall be substantially stiffer than the structure it reinforces so as to be effective;
- the bracing shall not buckle or exhibit a sharply nonlinear behaviour. In particular, any abrupt stiffening under any circumstance is to be avoided;
- permanent deformation in the bracing after an earthquake is acceptable provided that it does not impair normal functioning of the assembly.

Annex C (informative)

Dynamic analysis methods

C.1 General

As a general preliminary remark, it is necessary to check the adequateness of the finite element mesh to the maximum frequency content of the input signal (typically 35 Hz). The mesh size shall be fine enough to be able to reproduce the modal shapes corresponding to the higher frequencies taken into account.

C.2 Response spectrum analysis

For a given earthquake time history, the maximum response of a generic one degree of freedom elastic system, (characterized by a natural frequency f and a critical damping β) can be easily evaluated, so that we can obtain a function of this two parameters (f, β).

We define as Acceleration Response Spectrum of a given earthquake time history, the function $S_a(f, \beta)$ which describes the maximum acceleration of the generic one degree of freedom system for a given range of frequencies and damping values. Since the modal representation of a generic finite element elastic model is made by n orthogonal eigenvectors (where n is the number of modes) each one representing a one degree of freedom system, the acceleration response spectrum function provides the maximum acceleration for each eigenvector. By knowing maximum acceleration for each eigenvector (one degree of freedom system), maximum displacements, forces, etc can be computed.

Maximum quantities for the complete model are then computed by combining maximum modal quantities relevant to all computed modes; for this reason the quality of result depends on the computation of a sufficient number of eigenvectors.

To combine the maximum modal spectral responses the following rule is recommended:

$$a_{\max} = \sqrt{\sum_{m=c1-c2-\dots} a_e^2 + \left(\sum_{c1} |a_e|\right)^2 + \left(\sum_{c2} |a_e|\right)^2 + \left(\sum_{c3} |a_e|\right)^2 + \dots}$$

where

- a_{\max} is the combination result;
- m is the number of computed modes;
- a_e is the maximum response of the generic mode;
- $c1, c2, \text{ etc}$ are mode clusters whose frequencies are within 10 %.

This rule combines all “distant” modes and mode clusters through the Square Root of Sum of Squares (SRSS) rule. Within the generic mode cluster the modal quantities are combined by summing their absolute value.

Sufficient modes (modal mass) should be included to ensure an adequate representation of the structure dynamic response and constraints forces at supports. The suggested criterion for sufficiency in a particular direction shall be that the cumulative participating mass of the modes considered shall be at least 90 % of the actual mass.

If the participant mass does not reach 90 % within the 35 Hz range, it means that the finite element model has several resonant frequencies above 35 Hz and the effects of the orthogonal inputs can be taken into account as follows:

- determine the remaining effective mass in a given direction,
- apply for each component a static force equal to the mass of the component times the percentage of mass missing times the Zero Period Acceleration (ZPA),
- calculate stresses, reactions and so on,
- combine for each direction stresses, reactions and so on from the dynamic analysis with those from the analysis above using the SRSS rule described below.

When base excitation is applied along more than one orthogonal axis (biaxial or triaxial excitation) the responses relevant to different excitation direction shall be also combined. This further combination should be carried out following the SRSS rule.

$$A_{\max} = \sqrt{\sum_{j=1,3} a_{\max}^2} \quad \text{where } j = 1,3 \text{ are the excitation directions.}$$

When dynamic results computed by response spectrum analysis have to be combined with static ones (typically dead loads), the following scheme is recommended:

For displacements, velocities, acceleration, forces and moments the resultant should be computed by adding the static quantities to the response spectrum analysis result (signless) multiplied for the sign of the static ones. For stresses, it is required to combine static and response spectrum analysis values of all the stress tensor components, adding each component of the static stress tensor to the corresponding component of response spectrum analysis stress tensor multiplied by the sign of the static one.

C.3 Time history analysis

Time history analysis method involves time-step computation of the model dynamics: equations of motion are solved for each time-step, considering mass, stiffness, damping forces and external applied forces.

This method requires the use of synthetic input time histories compatible with the RRS: if available, those used for the shaking table test can be employed. Since results from a single set of compatible base time histories is not sufficient for qualification scopes, it is required to use at least 3 sets of different compatible base time histories.

Being a dynamic simulation of the structural dynamics, the identification of maximum quantities shall be carried out after the analysis.

Time history analysis for linear elastic models (the only one allowed by the present standard) can be carried out using either the modal transient analysis with “*m*” modal equations (being *m* the number of eigenvectors used) or the direct transient analysis with the complete set of “*n*” equations (being *n* is the degree of freedom number of the finite element model).

Modal transient analysis uses the same modal representation of the finite element model used by the response spectrum analysis. In analogy with the response spectrum analysis, an important issue is the check of the respect of the minimum participant mass percentage required (90 %) for each excitation direction (see C.2). Damping can be applied as modal damping, selecting a value for each mode.

Direct transient analysis solves directly the “*n*” equation of motion of the finite element model. Since no modal representation is used, the participant mass check is not an issue. The damping can be defined through the use of a damping matrix proportional to mass and/or

stiffness (Rayleigh damping) which corresponds to a percentage damping which is not constant along the frequency range, so that care shall be used.

Annex D (informative)

Expected peak ground accelerations for different earthquake scales

D.1 Earthquake zones

Earthquake zones are defined in a world-wide map of natural hazards according to the insurance Munich Re group.

In the following Table D.1 different earthquake zones are shown:

Table D.1 – Earthquake zones with earthquake intensity and magnitude scale

Earthquake Zones *	Earthquake Intensity Scales						Earthquake Magnitude Scale	
	MM 1956	Descriptive term	Acceleration % g (g = 9.81 m/s ²)	EMS 1992	RF 1883	JMA 1951	Magnitude**	According to Richter (1956) Log ₁₀ E = 11.8 + 1.5 M
Zone 0	I	Imperceptible	< 0.1	II	II	I	1.0-3.0	E = energy released (in erg); to be multiplied by 32 for each full M grade M = Richter Magnitude (up to M ~ 9.5) In addition to M, effects observed on the surface (-> intensities) depend mainly on the depth of and the distance from the focus, the duration of the earthquake and the prevailing subsoil conditions.
	II	Very slight	0.1-0.2	III	III		3.0-3.9	
	III	Slight	0.2-0.5	IV	IV	II	4.0-4.9	
	IV	Moderate	0.5-1	V	V	III	5.0-5.9	
	V	Rather strong	1-2	VI	VI	IV	6.0-6.9	
Zone 1	VI	Strong	2-5	VII	VII	V	7.0 and higher	
Zone 2	VII	Very strong	5-10	VIII	VIII			
Zone 3	VIII	Destructive	10-20	IX	IX	VI		
Zone 4	IX	Devastating	20-50	X	X			
	X	Annihilating	50-100 (-1g)	XI	XI			
	XI	Disaster	1-2g	XII	XII			
	XII	Major disaster	>2g			VII		

MM: 1956 Modified Mercalli
EMS: 1992 European Macroseismic Scale (Improvement of Medwedew-Sponheur-Karnik, 1964)
RF: 1883 Rossi-Forel
JMA: 1951 Japan Meteorological Agency

* Probable maximum intensity (MM: Modified Mercalli scale) with an exceedance probability of 10% in 50 years (equivalent to a "return period" of 475 years) for medium subsoil conditions

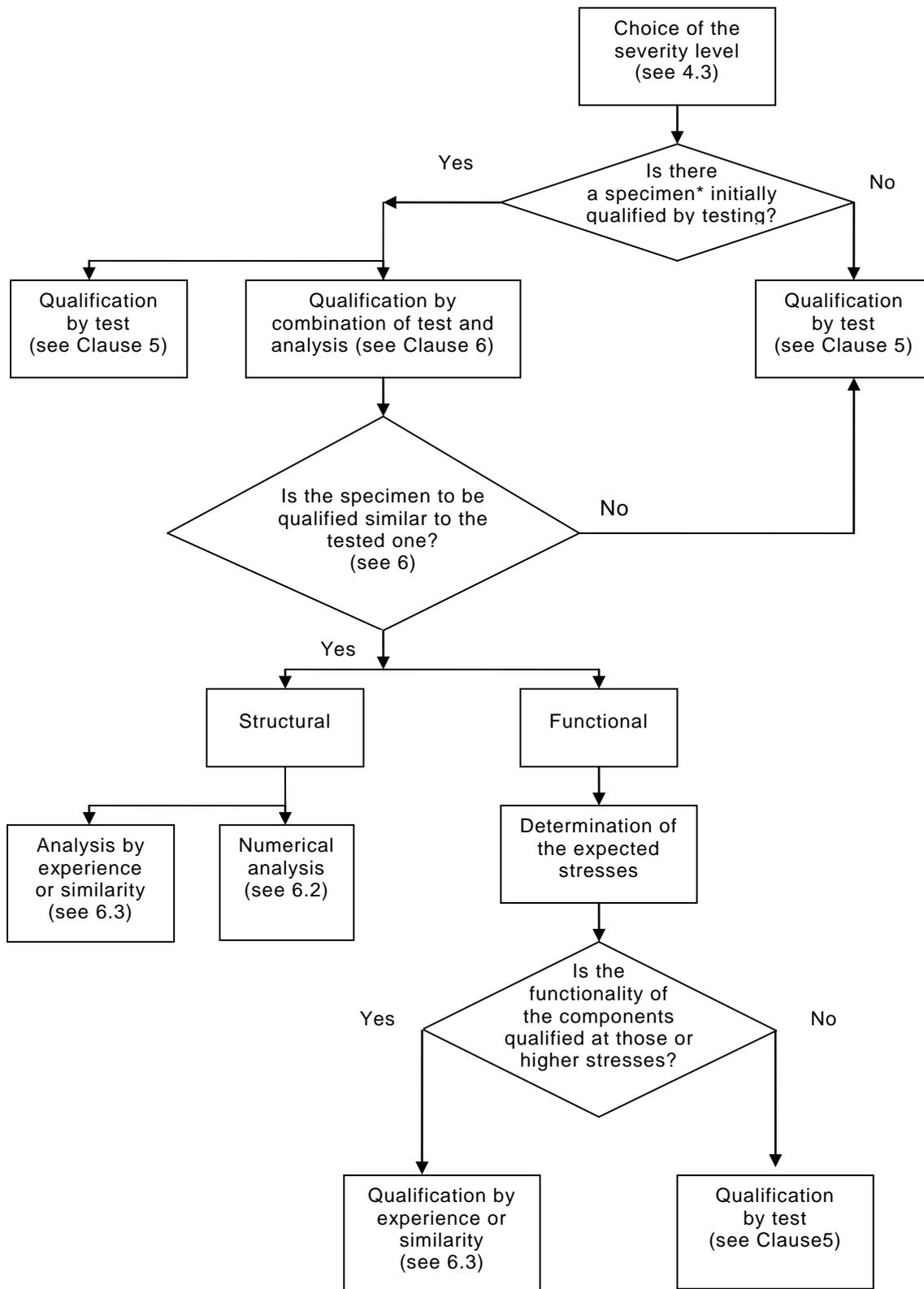
** according USGS - United States Geological Survey

NOTE See [2].

D.2 (Void)

Annex E (informative)

Qualification process flowchart



* the reference is the specimen initially tested under the seismic loads.

NOTE In any case, the qualification by testing is a possible solution.

Bibliography

- [1] IEEE 693:2005, *IEEE Recommended Practices for Seismic Design of Substations*
 - [2] USGS United States Geological Survey, available at
<http://earthquake.usgs.gov/learning/topics/mag_vs_int.php>
 - [3] IEC 60068-2-47, *Environmental testing – Part 2-47: Tests – Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests*
 - [4] ISO 7626-1, *Mechanical vibration and shock – Experimental determination of mechanical mobility – Part 1: Basic terms and definitions, and transducers specifications*
 - [5] ISO 7626-2, *Vibration and shock – Experimental determination of mechanical mobility – Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter*
 - [6] ISO 7626-5, *Vibration and shock – Experimental determination of mechanical mobility – Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	32
1 Généralités.....	34
1.1 Domaine d'application	34
1.2 Références normatives.....	34
2 Conditions normales et spéciales de service	35
3 Termes et définitions	35
4 Exigences de qualification sismique	35
4.1 Généralités.....	35
4.2 Analyse préliminaire	35
4.2.1 Choix du spécimen d'essai représentatif.....	35
4.2.2 Modèle mathématique du spécimen d'essai	35
4.3 Sévérités	36
4.3.1 Généralités.....	36
4.3.2 Niveau de sévérité 1	36
4.3.3 Niveau de sévérité 2.....	37
4.4 Classes d'acceptation	38
5 Qualification par essai	39
5.1 Généralités.....	39
5.2 Fixation	39
5.3 Paramètres d'essai.....	39
5.3.1 Mesures	39
5.3.2 Gamme de fréquences.....	40
5.3.3 Paramètres pour la recherche des fréquences de résonance	40
5.3.4 Paramètres pour l'essai par accélérogramme (essai de charge sismique).....	40
5.4 Procédure d'essai.....	40
5.4.1 Généralités.....	40
5.4.2 Inspection et vérification des fonctions	40
5.4.3 Recherche des fréquences de résonance	41
5.4.4 Essai par accélérogramme (essai de charge sismique).....	41
6 Qualification par combinaison d'essai et d'analyse	42
6.1 Généralités.....	42
6.2 Analyse numérique.....	42
6.2.1 Généralités.....	42
6.2.2 Données statiques (rigidité).....	43
6.2.3 Données dynamiques	43
6.2.4 Modèle numérique	43
6.2.5 Méthodes de calcul.....	43
6.3 Analyse par expérience ou similitude.....	44
7 Évaluation de la qualification sismique	45
7.1 Critères de validité de l'essai sismique	45
7.2 Critères d'acceptation des résultats d'essai	45
7.3 Critères d'acceptation du modèle	45
7.4 Critères d'acceptation des résultats d'analyse numérique.....	46
7.5 Critères d'acceptation des résultats d'analyse par similitude	46
8 Documentation	46

8.1	Informations pour la qualification sismique	46
8.2	Rapport d'essai	46
8.3	Rapport d'analyse lorsque l'analyse est une analyse numérique	47
8.4	Rapport d'analyse lorsque l'analyse est effectuée par similitude	47
Annexe A (normative)	Caractérisation du spécimen d'essai pour analyse	48
Annexe B (informative)	Critères d'adéquation sismique des ensembles d'appareillage sous enveloppe.....	49
Annexe C (informative)	Méthodes d'analyse dynamique.....	52
Annexe D (informative)	Accélérations crête attendues du sol pour différentes échelles de séismes	55
Annexe E (informative)	Logigramme du processus de qualification	57
	Bibliographie.....	58
Figure 1	– Niveau de sévérité 1 (horizontal) – Accélération de période nulle (APN) = 0,5 g.....	37
Figure 2	– Niveau de sévérité 2 (horizontal) – Accélération de période nulle (APN) = 1 g.....	38
Table D.1	– Echelles d'intensité et de magnitude des zones sismiques.....	55

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

**Partie 210: Qualification sismique pour ensembles
d'appareillage sous enveloppe métallique pour tensions
assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV**

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 tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique

- lorsqu'en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale, ou
- lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou quand, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat.

Les spécifications techniques font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales.

La CEI 62271-210, qui est une spécification technique, a été établie par le sous-comité 17C: Ensembles d'appareillages à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

Le texte de cette spécification technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
17C/515/DTS	17C/548/RVC

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62271, regroupées sous le titre général *Appareillage à haute tension*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de 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

- transformée en Norme internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 210: Qualification sismique pour ensembles d'appareillage sous enveloppe métallique pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62271 s'applique à des ensembles d'appareillage sous enveloppe métallique satisfaisant à la CEI 62271-200 pour les enveloppes métalliques et à la CEI 62271-201 pour les enveloppes isolées. Ces ensembles d'appareillage sont montés au sol ou sur le plancher d'un bâtiment et sont destinés à être utilisés dans des conditions sismiques.

La qualification sismique des ensembles d'appareillage tient compte de tous les auxiliaires et du système de contrôle monté directement dans l'assemblage.

Elle définit les niveaux de sévérité sismique, les niveaux d'acceptation et fournit un choix de méthodes pouvant être appliquées pour démontrer la performance des ensembles d'appareillage à haute tension pour lesquels une qualification sismique est requise.

La qualification sismique des ensembles d'appareillage n'est effectuée que sur demande.

1.2 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 60068-2-6, *Essais d'environnement – Partie 2-6: Essais – Essai Fc: Vibrations (sinusoïdales)*

CEI 60068-2-57:1999, *Essais d'environnement – Partie 2-57: Essais – Essai Ff: Vibrations – Méthode par accélérogrammes*

CEI 60068-2-64, *Essais d'environnement – Partie 2-64: Essais – Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande et guide*

CEI 60068-3-3:1991, *Essais d'environnement – Partie 3: Guide – Méthodes d'essai sismiques applicables aux matériels*

CEI 62271-1:2007, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

CEI 62271-200, *Appareillage à haute tension – Partie 200: Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

CEI 62271-201, *Appareillage à haute tension – Partie 201: Appareillage sous enveloppe isolante pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

2 Conditions normales et spéciales de service

(vide)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60068-3-3, la CEI 62271-1, la CEI 62271-200, la CEI 62271-201 et l'ISO 2041 s'appliquent.

4 Exigences de qualification sismique

4.1 Généralités

La qualification sismique doit démontrer l'aptitude des ensembles d'appareillage à supporter des contraintes sismiques.

L'essai est le moyen de base pour réaliser une qualification sismique parce qu'il permet de vérifier la fonctionnalité d'un équipement pendant et après la sollicitation sismique. L'essai permet aussi de fournir les données nécessaires à la réalisation d'un modèle dans le cas d'une analyse numérique.

Une combinaison essai et analyse est nécessaire car il n'est pas possible de tester tous les types d'arrangement d'appareillage.

4.2 Analyse préliminaire

4.2.1 Choix du spécimen d'essai représentatif

Pour des raisons pratiques relatives à la disponibilité des moyens d'essais, la qualification sismique des ensembles d'appareillage nécessite le choix de spécimens d'essai appropriés représentant raisonnablement l'ensemble du système dans le but de vérifications structurales et fonctionnelles.

De tels spécimens d'essai doivent comporter les appareils de connexion équipés de leurs mécanismes de manœuvres et de l'équipement de commande appropriés ainsi que de leurs interfaces électriques et mécaniques.

Ces spécimens d'essai doivent être représentatifs des configurations les plus défavorables telles que celles qui ont la masse la plus grande et le centre de gravité le plus haut. Dans le cas d'unités fonctionnelles ayant des masses différentes, la plus lourde doit être placée à une extrémité du dispositif d'essai. On peut utiliser un calcul par simulation pour déterminer le spécimen d'essai qui satisfait aux critères ci-dessus.

4.2.2 Modèle mathématique du spécimen d'essai

Si l'on prévoit une qualification par essai et analyse numérique combinés, conformément à l'Article 6, un modèle mathématique tridimensionnel du spécimen d'essai doit être créé en se basant sur les informations techniques relatives aux caractéristiques de conception.

Un tel modèle doit tenir compte de la présence des appareils de commande et de contrôle, avec leurs compartiments et leurs structures de support et doit avoir une sensibilité suffisante pour décrire le comportement dynamique du spécimen d'essai dans la gamme de fréquences étudiée.

La validité du modèle doit être établie par comparaison entre les résultats de simulation et les résultats d'essais réels, comme indiqué en 7.3.

4.3 Sévérités

4.3.1 Généralités

Dans la zone sismique 4 (risque de séismes très sévères) l'accélération crête mesurée du sol est en général approximativement de 0,5 g. Dans quelques cas, l'accélération crête mesurée du sol se situe autour de 1 g (voir également l'Annexe D).

En raison de la variabilité importante des mouvements du sol, des conditions des sites, des installations des appareillages dans les bâtiments, deux niveaux de sévérités sont définis pour la qualification sismique afin d'éviter de concevoir ou de tester les niveaux de sévérité toujours les plus élevés.

Le Spectre de Réponse Spécifié (SRS) (niveaux de sévérité 1 et 2) est un spectre de réponse à large bande permettant de couvrir un grand nombre de conditions de sites (magnitude, profondeur et distance par rapport à l'épicentre, sol rocheux ou tendre) ainsi que des installations à des étages élevés du bâtiment.

Pour la qualification, l'un des niveaux de sévérité suivant doit être choisi:

Le niveau de sévérité 1 est recommandé pour les accélérations crête du sol ou du plancher inférieures ou égales à 0,5 g.

Le niveau de sévérité 2 est recommandé pour les accélérations crête du sol ou du plancher inférieures ou égales à 1 g.

Les Spectres de Réponse Spécifiés sont indiqués aux Figures 1 et 2 pour les différents niveaux de qualification sismique. Les courbes concernent des taux d'amortissement des ensembles d'appareillage de 2 %, 5 % et 10 %. Pour les essais et si le taux d'amortissement est inconnu, un taux d'amortissement de 5 % est recommandé.

Le niveau de sévérité 1 est recommandé pour les équipements montés au niveau du sol pour les zones 0 à 4 ou installés à des étages supérieurs et combinés avec les zones sismiques 0 à 3 (voir Annexe D). Pour la zone 0, aucune qualification sismique n'est nécessaire.

Le niveau de sévérité 2 n'est recommandé que pour les équipements montés à des étages supérieurs combinés avec la zone sismique 4 (voir Annexe D).

Si des conditions spécifiques relatives au site sont connues, l'utilisateur peut créer un spectre de réponse spécifique à celui-ci qui enveloppe la sévérité 1 et/ou la sévérité 2.

NOTE Le niveau de sévérité 1 est équivalent au niveau de performance modérée de l'IEEE 693:2005.

Le niveau de sévérité 2 est équivalent au niveau de performance élevée de l'IEEE 693:2005.

4.3.2 Niveau de sévérité 1

Le SRS est décrit par les équations suivantes:

Accélérations spectrales horizontales S_a (m/s²) pour les fréquences f (Hz):

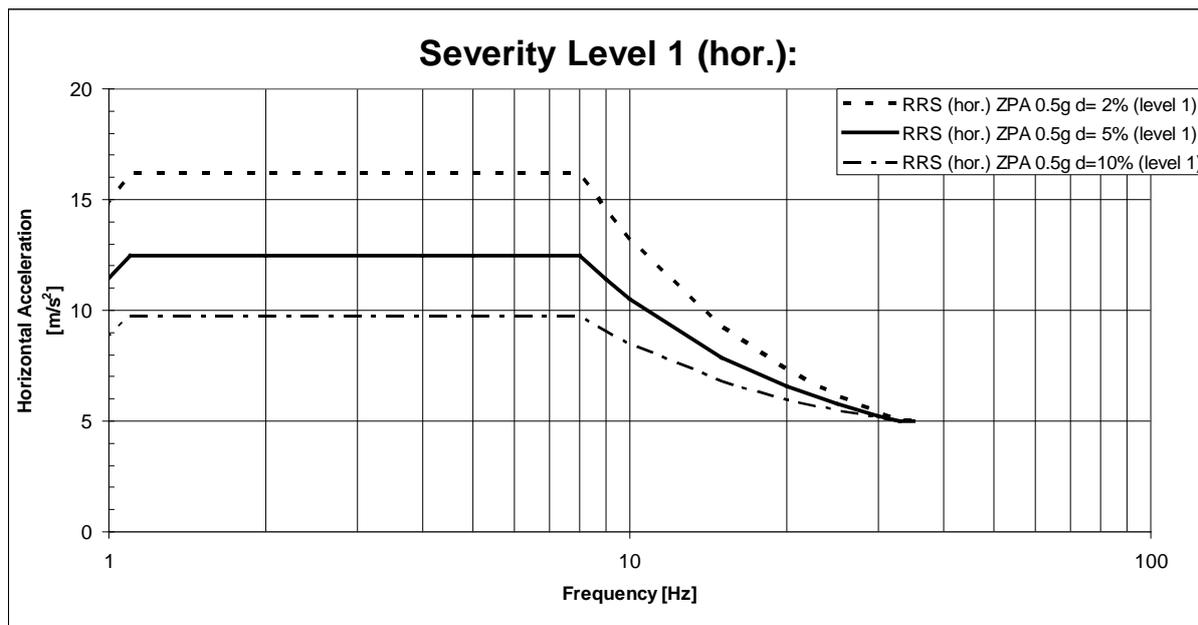
- $S_a = 1,144 \times \beta \times f \times g$ pour $0,0 \leq f \leq 1,1$
- $S_a = 1,250 \times \beta \times g$ pour $1,1 \leq f \leq 8,0$
- $S_a = 2 \times ((6,62 \times \beta - 2,64) / f - 0,2 \times \beta + 0,33) \times g$ pour $8,0 \leq f \leq 33$
- $S_a = 0,5 \times g$ pour $f \geq 33$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d))/2,1156$, où d est le pourcentage d'amortissement (2, 5, 10, etc.) et $d \leq 20$ %.
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

Pour la qualification, le SRS est limité à une gamme de fréquences démarrant à 1,0 Hz (voir 5.3.2).

Pour les accélérations spectrales verticales, le facteur de conversion est de 0,8.

NOTE Le facteur de conversion est de 0,8 afin d'harmoniser les valeurs définies par les normes IEEE et CEI.



IEC 245/13

Légende

Anglais	Français
Severity level 1 (hor.)	Niveau de sévérité 1 (horizontal)
Horizontal acceleration (m/s ²)	Accélération horizontale (m/s ²)
Frequency (Hz)	Fréquence (Hz)
RRS (hor.) ZPA 0,5g d = 2 % (level 1)	SRS (hor.) APN 0,5 g d = 2 % (niveau 1)
RRS (hor.) ZPA 0,5g d = 5 % (level 1)	SRS (hor.) APN 0,5 g d = 5 % (niveau 1)
RRS (hor.) ZPA 0,5g d = 10 % (level 1)	SRS (hor.) APN 0,5 g d = 10 % (niveau 1)

SOURCE: Reproduit de l'IEEE 693:2005, *IEEE Recommended Practice For Seismic Design of Substations* (disponible en anglais seulement) avec la permission de l'IEEE.

Figure 1 – Niveau de sévérité 1 (horizontal) – Accélération de période nulle (APN) = 0,5 g

4.3.3 Niveau de sévérité 2

Le SRS est décrit par les équations suivantes:

Accélérations spectrales horizontales S_a (m/s²) pour les fréquences f (Hz):

- $S_a = 2,288 \times \beta \times f \times g$ pour $0,0 \leq f \leq 1,1$
- $S_a = 2,5 \beta \times g$ pour $1,1 \leq f \leq 8,0$

- $S_a = 2 \times ((13,2 \times \beta - 5,28) / f - 0,4 \times \beta + 0,66) \times g$ pour $8,0 \leq f \leq 33$
- $S_a = 1 \times g$ pour $f \geq 33$

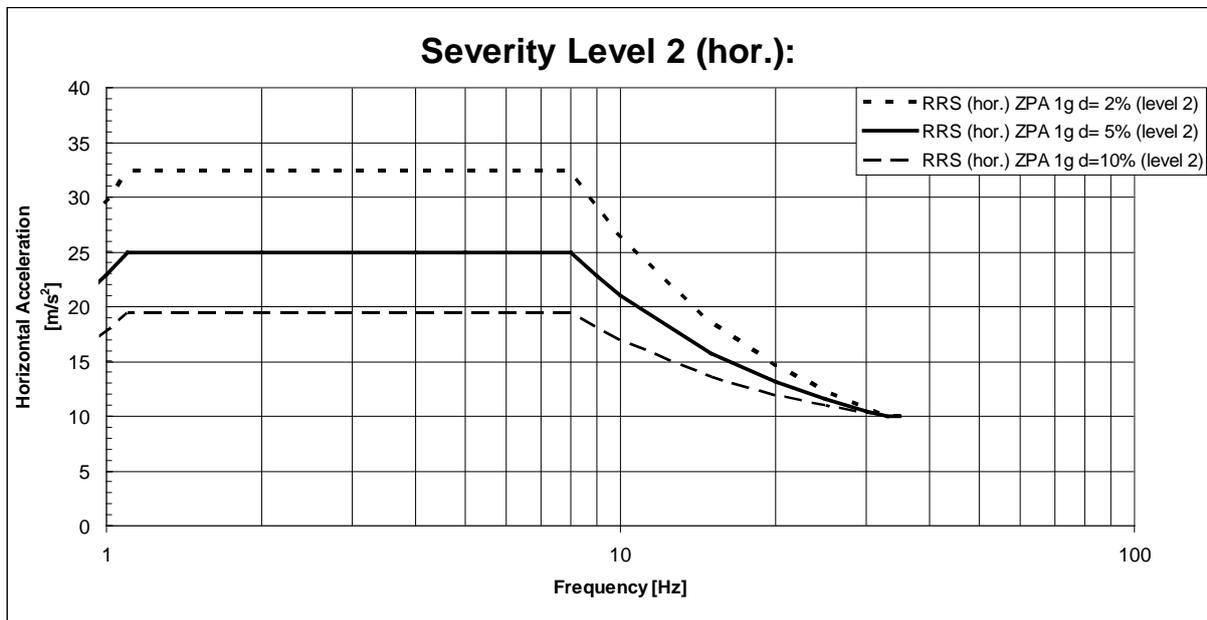
$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d))/2,115 6$, où d est le pourcentage d'amortissement (2, 5, 10, etc.) et $d \leq 20$ %.

$g = 10 \text{ m/s}^2$

Pour la qualification, le SRS est limité à une gamme de fréquences démarrant à 1,0 Hz (voir 5.3.2).

Pour les accélérations spectrales verticales, le facteur de conversion est de 0,8.

NOTE Le facteur de conversion est de 0,8 afin d'harmoniser les valeurs définies par les normes IEEE et CEI.



IEC 246/13

Légende

Anglais	Français
Severity level 2 (hor.)	Niveau de sévérité 2 (horizontal)
Horizontal acceleration (m/s ²)	Accélération horizontale (m/s ²)
Frequency (Hz)	Fréquence (Hz)
RRS (hor.) ZPA 1 g d = 2 % (level 1)	SRS (hor.) APN 1 g d = 2 % (niveau 2)
RRS (hor.) ZPA 1 g d = 5 % (level 1)	SRS (hor.) APN 1 g d = 5 % (niveau 2)
RRS (hor.) ZPA 1 g d = 10 % (level 1)	SRS (hor.) APN 1 g d = 10 % (niveau 2)

SOURCE: Reproduit de l'IEEE 693:2005, *IEEE Recommended Practice For Seismic Design of Substations* (disponible en anglais seulement) avec la permission de l'IEEE.

Figure 2 – Niveau de sévérité 2 (horizontal) – Accélération de période nulle (APN) = 1 g

4.4 Classes d'acceptation

Deux classes d'acceptation d'équipement sont définies:

Pour la classe 1, l'équipement doit conserver sa fonctionnalité pendant et après le séisme. Après l'événement sismique, une maintenance et un remplacement partiel peuvent s'avérer nécessaires pour garantir un fonctionnement à long terme.

Pour la classe 2, l'équipement doit conserver sa fonctionnalité pendant et après le séisme. Après l'événement sismique, aucune maintenance n'est requise.

5 Qualification par essai

5.1 Généralités

La procédure d'essai doit être conforme à la CEI 60068-3-3 et l'essai par accélérogramme qui doit être appliqué en référence à la CEI 60068-2-57. La méthode d'essai par accélérogramme simule les conditions réelles de manière plus précise, car le comportement du spécimen d'essai est toujours non linéaire.

Il convient que l'essai sismique démontre l'aptitude des ensembles d'appareillage à exécuter leurs fonctions requises pendant et après des charges sismiques définies par le Spectre de Réponse Essai (SRE) qui enveloppe le SRS. La démonstration doit être effectuée comme présenté en 5.4.1 et en 5.4.3.

Si un spécimen d'essai ne peut pas être testé avec sa structure de support (par exemple, en raison de sa taille), la contribution dynamique de la structure doit être déterminée par analyse et prise en compte durant l'essai.

5.2 Fixation

Le spécimen d'essai doit être monté comme en condition de service, en y incluant les amortisseurs (le cas échéant).

Si les conditions de service ne sont pas connues de façon précise, une structure de base rigide doit être utilisée entre l'équipement et la table vibrante.

L'orientation horizontale du spécimen d'essai doit être dans la direction d'excitation, agissant le long de ses deux axes orthogonaux principaux.

Toute monture ou liaison requise uniquement pour l'essai ne doit pas avoir d'influence sur le comportement dynamique du spécimen d'essai.

La méthode de montage du spécimen d'essai doit être documentée et doit inclure une description de tous les appareils et connexions qui s'y rapportent (voir CEI 60068-2-47).

5.3 Paramètres d'essai

5.3.1 Mesures

Il convient que les mesures soient effectuées conformément au 5.2 de la CEI 60068-3-3:1991.

Les signaux ci-dessous doivent être au moins enregistrés:

- accélération de la table vibrante,
- accélération à des emplacements significatifs du spécimen d'essai:
 - au moins un point de mesure directement raccordé à la structure principale (habituellement en haut de l'appareillage),
 - près du centre de gravité (s'il est accessible),
 - sur les composants critiques (par exemple, les masses lourdes).

5.3.2 Gamme de fréquences

La gamme de fréquences doit être comprise entre 1 Hz et au moins 35 Hz conformément à l'Annexe B de la CEI 60068-2-57:1999, car dans les séismes, les fréquences prédominantes sont situées dans cette gamme. La gamme de fréquences est appliquée à l'essai de recherche des fréquences de résonance et à la génération d'ondes sismiques artificielles.

La première fréquence de résonance pour un spécimen d'essai classique dans la direction horizontale se situe entre 5 Hz et 10 Hz, les fréquences d'essai inférieures à 1 Hz ne sont donc pas pertinentes.

En raison de la limitation de certaines tables vibrantes, il n'est pas exigé d'envelopper le SRS pour des fréquences en dessous de 70 % de la plus petite fréquence de résonance de l'équipement.

5.3.3 Paramètres pour la recherche des fréquences de résonance

L'essai de recherche des fréquences de résonance doit être effectué conformément au 10.1 de la CEI 60068-3-3:1991.

L'accélération recommandée pendant la recherche des fréquences de résonance est de 0,1 g. La recherche doit être effectuée avec des balayages sinusoïdaux successivement dans les trois axes principaux et à une vitesse maximale de 1 octave/min.

5.3.4 Paramètres pour l'essai par accélérogramme (essai de charge sismique)

Les directions d'essai doivent être choisies conformément à l'Article 15 de la CEI 60068-3-3:1991.

Un essai tri-axial est recommandé.

Le niveau de sévérité doit être choisi conformément à 4.3.

La durée totale de l'accélérogramme doit être supérieure ou égale à 30 s et la durée de la partie amplifiée du SRS doit être supérieure ou égale à 20 s

5.4 Procédure d'essai

5.4.1 Généralités

La séquence d'essai doit être la suivante:

- vérification fonctionnelle avant essai;
- recherche des fréquences de résonance (requis pour déterminer les fréquences critiques et les taux d'amortissement et/ou pour l'analyse);
- essai par accélérogramme (essai sismique);
- recherche des fréquences de résonance;
- vérification fonctionnelle après essai.

5.4.2 Inspection et vérification des fonctions

Avant et après les essais, les caractéristiques de fonctionnement ou les réglages suivants doivent être enregistrés ou évalués (le cas échéant) à la tension d'alimentation et à la pression de fonctionnement assignées:

- a) inspection visuelle;
- b) fonctionnement de tous les circuits de commande;

- c) temps de fermeture de tous les circuits de commande à fermeture rapide;
- d) temps d'ouverture de tous les circuits de commande à ouverture rapide;
- e) fonctionnement de toute partie séparable ou pouvant être retirée;
- f) étanchéité aux gaz et/ou aux liquides le cas échéant;
- g) mesure de la résistance du circuit principal;
- h) essai de tenue de tension à fréquence industrielle pour contrôler le circuit principal (tous les dispositifs de commande étant en position fermée) entre phases et entre phase et terre, conformément au 6.2.11 de la CEI 62271-1:2007;
- i) essai de tenue de tension à fréquence industrielle pour contrôler les appareils de commande en position ouverte, conformément au 6.2.11 de la CEI 62271-1:2007.

Ces essais fonctionnels peuvent être effectués dans le laboratoire du fabricant.

5.4.3 Recherche des fréquences de résonance

L'essai de recherche des fréquences de résonance doit être effectué conformément au 10.1 de la CEI 60068-3-3:1991.

5.4.4 Essai par accélérogramme (essai de charge sismique)

L'essai par accélérogramme doit être effectué une fois conformément à la CEI 60068-2-57 avec les paramètres définis en 5.3.4.

Pendant l'essai sismique, les paramètres suivants doivent être enregistrés, en plus de ceux définis en 5.3.1:

- continuité électrique du circuit principal (le cas échéant);
- continuité électrique des circuits auxiliaire et de contrôle (contacts NO/NC représentatifs).

Pendant l'essai, les circuits de contrôle doivent être alimentés à la tension assignée.

Un passage d'essai est requis, avec initialement, tous les appareils de commande en position fermée et leur aptitude à manœuvrer pendant la partie forte de l'accélérogramme:

- pendant cet essai de fonctionnement, chaque disjoncteur doit exécuter au moins une séquence de fonctionnement (recommandation: O-5s-C-5s-O au milieu de la durée totale et par conséquent au milieu de la partie forte),
- les autres appareils de commande doivent fonctionner comme spécifié (par exemple, commande d'ouverture pour les commutateurs de rupture de charge),
- les appareils de commande ne devant pas fonctionner pendant les essais sismiques doivent rester en position fermée sans manœuvrer.

NOTE 1 Les disjoncteurs manœuvrent même pendant des événements d'origine sismique. Pour les autres appareils de commande, une preuve de fonctionnement est apportée uniquement si le fabricant a spécifié cette fonctionnalité.

NOTE 2 Un essai supplémentaire peut être réalisé de manière facultative, avec tous les appareils de commande en position fermée sans manœuvre. Ceci conduit à une qualification valide pour la présente norme et pour l'IEEE 693.

Les critères d'évaluation de la validité de l'essai et les résultats de l'essai sont fournis en 7.1 et 7.2.

Si l'essai est destiné à être utilisé comme référence pour une analyse numérique, des enregistrements complémentaires doivent alors être effectués afin de fournir des données pertinentes. Les autres paramètres d'essai sont:

- la déviation des composants pour lesquels on s'attend à des déplacements significatifs,

- les déformations sur les éléments critiques (par exemple, paliers, brides, enveloppes et structures de support),
- l'accélération aux emplacements pertinents du spécimen d'essai.

6 Qualification par combinaison d'essai et d'analyse

6.1 Généralités

On ne peut pas appliquer une analyse seule car les ensembles d'appareillage sous enveloppe métallique sont des dispositifs complexes et l'aptitude fonctionnelle ne peut pas être vérifiée par des techniques d'analyse seules.

Une analyse peut être réalisée:

- pour la validation d'ensembles d'appareillage ayant déjà été testés dans la même configuration avec des conditions sismiques différentes;
- pour la validation d'ensembles d'appareillage similaires à ceux qui ont déjà été testés avec des conditions sismiques identiques mais incluant des modifications ayant une influence sur le comportement dynamique (par exemple, une modification de l'agencement des ensembles d'appareillage ou de la masse des composants);
- pour la validation d'ensembles d'appareillage ne pouvant pas être qualifiés par un essai seul (par exemple, en raison de leur taille et/ou de leur complexité).

La méthode comprend l'analyse de la partie structurale et l'essai de la fonctionnalité, séparément.

La partie structurale est principalement constituée par l'ossature incluant les renforts, les cadres, les traverses et les fixations qui transmettent toutes les charges sismiques entre l'équipement et le plancher. Le comportement dynamique de l'équipement ou de l'ensemble dépend de la partie structurale.

Deux ensembles ou plus peuvent être considérés comme structurellement similaires lorsqu'ils ont la même architecture et les mêmes types de connexions; ils peuvent différer par la répartition de la masse et/ou les dimensions.

La partie fonctionnelle est constituée de composants qui sont considérés comme des regroupements secondaires logiques de fonctions de l'équipement, généralement organisés et agencés sous forme de dispositifs physiques, de modules ou de sous-ensembles pouvant être séparés de l'équipement et pouvant être placés sur un montage d'essai qui conserve l'environnement mécanique et électrique et qui peut être testé de façon indépendante.

On peut utiliser deux méthodes pour effectuer la validation mécanique:

- une analyse numérique,
- une analyse basée sur la similitude.

6.2 Analyse numérique

6.2.1 Généralités

Une analyse numérique ne doit être utilisée que pour démontrer l'intégrité structurale. On peut calculer des accélérations supplémentaires aux points de fixation de l'équipement.

La partie fonctionnelle doit être démontrée à partir de données expérimentales (voir 6.3).

Une analyse numérique est effectuée avec un modèle numérique qui doit être recalé en utilisant des données statiques et/ou dynamiques suivant la méthode numérique adoptée (voir Annexe C).

6.2.2 Données statiques (rigidité)

La rigidité de la structure dans la direction horizontale peut être obtenue en appliquant une force statique en haut de celle-ci.

Si la structure n'est pas symétrique par rapport à un axe, au moins deux forces statiques orthogonales différentes doivent être appliquées.

6.2.3 Données dynamiques

Des données dynamiques (taux d'amortissement, fréquences critiques, déformées modales, réponses en accélération sur différents points de la structure) pour une analyse numérique doivent être obtenues à partir d'un essai dynamique sur un spécimen d'essai similaire (voir Annexe A).

Si pendant l'essai on détecte un comportement non linéaire de la structure, l'analyse doit être réévaluée en tenant compte des résultats de l'essai en utilisant une rigidité élastique et un amortissement équivalents.

NOTE La non linéarité concerne principalement l'amortissement qui peut être relativement différent d'un niveau de sévérité à un autre et croit en général avec une sévérité croissante, ainsi que la raideur, qui peut varier avec des charges croissantes et en conséquence, peut modifier les fréquences de résonance.

6.2.4 Modèle numérique

La procédure générale est la suivante:

- a) création du modèle par éléments finis (EF) en identifiant les parties agissant sur la raideur de la structure (et devant donc être modélisées en utilisant des EF structuraux) et des parties agissant comme des masses (et pouvant donc être modélisées en utilisant des EF d'inertie);
- b) recalage du modèle EF en utilisant les données expérimentales de 6.2.2 et/ou de 6.2.3 en fonction de la méthode de calcul utilisée;
- c) compte tenu de la modularité des ensembles d'appareillage, le modèle numérique recalé du spécimen d'essai peut être étendu à un jeu complet d'ensembles ayant tous une structure similaire;
- d) détermination de la réponse, dans la plage de fréquences indiquée en 5.3.2, en utilisant les méthodes décrites dans les paragraphes suivants (voir 6.2.5);
- e) conclusion sur le comportement mécanique sismique en fonction des critères d'acceptation indiqués en 7.4.

6.2.5 Méthodes de calcul

6.2.5.1 Analyse du coefficient statique

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que l'assemblage complet est soumis à la même accélération. Il s'agit d'une technique simple qui permet d'estimer l'intégrité structurale, avec un niveau de conservatisme élevé.

Il convient de ne l'utiliser que lorsqu'on s'attend à ce que les accélérations sur les composants ou sur leurs points d'ancrage soient inférieures ou égales aux valeurs mesurées correspondantes sur l'assemblage testé.

Si la première fréquence propre est inconnue, l'accélération dont on doit tenir compte doit être l'accélération maximale du spectre de réponse spécifié avec un amortissement de 5 % (dans le cas où la valeur d'amortissement est inconnue).

Si la première fréquence propre est connue, l'accélération dont on doit tenir compte doit être l'accélération lue sur le spectre de réponse spécifié à cette fréquence et pour un amortissement de 5 % (dans le cas où la valeur d'amortissement est inconnue).

Dans les deux cas, on doit appliquer un coefficient de 1,5 pour tenir compte de l'effet des modes de fréquence supérieurs.

Les forces sismiques sur chaque composant des ensembles d'appareillage sont donc obtenues en multipliant les valeurs de leur masse, concentrée au centre de gravité, par cette accélération.

6.2.5.2 Analyse dynamique spectrale

Pour un équipement dont la première fréquence propre est inférieure à 35 Hz, l'analyse dynamique spectrale est recommandée.

Si on la compare à l'analyse du coefficient statique (voir 6.2.5.1), cette méthode permet de calculer la répartition de l'accélération maximale sur l'ensemble.

Si on la compare à l'analyse par accélérogrammes (voir 6.2.5.3), cette méthode permet d'utiliser directement le spectre de réponse spécifié.

La réponse d'intérêt, déformée, contrainte ou accélération, est déterminée en combinant la réponse modale de tous les modes significatifs (voir la procédure de combinaison recommandée à l'Annexe C).

6.2.5.3 Analyse dynamique par accélérogrammes

L'analyse dynamique par accélérogrammes est la technique de calcul dynamique la plus précise, mettant en œuvre des calculs pas à pas des phénomènes dynamiques. Elle est fondée sur une définition correcte des accélérogrammes qui doit satisfaire au spectre de réponse requis. Dans ce cas, cette méthode peut donner les résultats les plus précis. Mais elle n'est pas recommandée, car pour la qualification sismique, ces niveaux de détails ne sont pas nécessaires.

La procédure de l'analyse dynamique par accélérogrammes est décrite à l'Annexe C.

6.3 Analyse par expérience ou similitude

Outre l'analyse numérique, l'analyse par expérience peut constituer une autre manière d'obtenir la qualification sismique. Elle nécessite des données d'équipements de conception similaires ayant passé la qualification sismique avec succès lors d'essais précédents.

Chaque modification structurale prouvant que la rigidité n'est pas dégradée est acceptable. Dans ces conditions, l'analyse par expérience doit démontrer que des modifications ne génèrent pas de contraintes supérieures à celles qui sont obtenues pendant l'essai de qualification sur l'équipement similaire.

Par exemple, une masse que l'on déplace de haut en bas produit une diminution du moment de flexion des points d'ancrage du bas de la structure.

S'il existe une équivalence entre les composants à qualifier et les composants ayant été précédemment testés, la fonctionnalité doit être démontrée. Ceci signifie qu'il existe un haut degré de similitude des composants et la sévérité locale sur chaque composant doit être au plus égale à ou moins sévère que celle vue pendant les essais de qualification.

S'il n'y a pas d'équivalence ou en cas de nouveau composant, la fonctionnalité doit être démontrée à partir d'essais dynamiques représentatifs des conditions locales liées à l'environnement et à la sévérité du composant.

7 Évaluation de la qualification sismique

7.1 Critères de validité de l'essai sismique

La forme d'onde de l'essai sismique doit produire un spectre de réponse d'essai qui enveloppe le spectre de réponse requis (calculé avec le même taux d'amortissement) et qui possède une accélération de crête supérieure ou égale à l'accélération de période nulle. Les détails relatifs aux critères de validité des essais sismiques sont donnés dans la CEI 60068-2-57.

7.2 Critères d'acceptation des résultats d'essai

Pour la classe d'acceptation 1, on doit contrôler:

- a) la rigidité diélectrique, le pouvoir de coupure et le pouvoir de transporter du courant de l'appareillage ne doivent pas être affectés, une preuve en est donnée par comparaison des enregistrements des vérifications fonctionnelles avant et après l'essai (selon 5.4.1). Aucune modification significative ne doit se produire; toutes les valeurs mesurées doivent se trouver dans les tolérances appropriées données par le fabricant;
- b) les contacts principaux doivent rester en position ouverte ou fermée pendant un passage d'essai sismique sans actionnement mécanique des dispositifs de commande;
- c) les contacts principaux doivent atteindre les positions prévues pendant un passage d'essai sismique avec actionnement mécanique des dispositifs de commande;
- d) le battement des relais ne doit pas provoquer l'actionnement des auxiliaires de commutation pendant l'essai sismique.

Pour la classe d'acceptation 2, tous les critères d'acceptation de la classe 1 doivent être satisfaits, ainsi que les critères suivants:

- les valeurs des fréquences de résonance ne doivent pas changer de plus de 20 % par rapport à celles mesurées après essai;
- aucune fissure sur les pièces principales n'est acceptable (par exemple, les éléments structuraux primaires et les pièces isolantes);
- des déformations sont acceptables tant qu'elles ne remettent pas en cause la fonctionnalité à long terme;
- l'état des dispositifs de fixation de l'équipement doit être conservé;
- toute partie séparable ou pouvant être retirée doit fonctionner correctement;
- les circuits auxiliaires et les circuits de contrôle ne doivent pas délivrer d'informations erronées concernant l'état des ensembles d'appareillage (position, signaux d'alarme).

NOTE 1 Un battement inférieur à 2 ms est considéré normalement comme acceptable.

NOTE 2 Une réinitialisation de l'équipement de surveillance est considérée comme acceptable si la performance globale des ensembles d'appareillage n'est pas affectée.

7.3 Critères d'acceptation du modèle

On considère que le modèle est cohérent si les accélérations calculées des dispositifs qui font partie de l'ensemble sont supérieures ou égales aux valeurs mesurées pendant l'essai.

Les fréquences propres et les modes de vibrations doivent être comparés afin de vérifier la cohérence du modèle.

7.4 Critères d'acceptation des résultats d'analyse numérique

Lorsqu'un matériau est ductile, les contraintes équivalentes de Von Mises de chaque composant ne doivent pas dépasser 100 % de la limite d'élasticité du matériau.

Lorsqu'un matériau est fragile, les contraintes équivalentes de Von Mises ne doivent pas dépasser 100 % de la contrainte minimale garantie en flexion.

NOTE 1 Un matériau est ductile s'il subit une déformation plastique considérable avant rupture.

NOTE 2 Un matériau est cassant s'il subit une déformation plastique limitée ou nulle avant rupture.

7.5 Critères d'acceptation des résultats d'analyse par similitude

Les contraintes mécaniques attendues sur l'équipement à qualifier doivent être inférieures ou égales aux contraintes sur les mêmes points qui ont été mesurées précédemment sur un équipement similaire ayant réussi l'essai.

8 Documentation

8.1 Informations pour la qualification sismique

Les informations suivantes sont requises pour l'analyse ou l'essai des ensembles d'appareillage:

- a) niveau de sévérité (voir 4.3);
- b) classe d'acceptation (voir 4.4);
- c) plan d'ensemble de la structure et plan de montage (voir 5.1 et 5.2);
- d) nombre et position relative des axes d'essai (voir 5.2).

8.2 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir les éléments suivants:

- a) la sévérité:
 - le niveau de sévérité;
 - la classe d'acceptation;
- b) un fichier d'identification des ensembles d'appareillage incluant la structure et les détails de montage:
 - un dessin de l'ensemble des objets soumis à essai, incluant le poids, le centre de gravité et les points de mesure;
- c) l'installation d'essai:
 - l'emplacement;
 - la description de l'équipement d'essai et l'étalonnage;
- d) la méthode d'essai et les procédures:
 - le nombre et la position relative des axes d'essai;
 - le nombre et les conditions des passages d'essai;
- e) les données d'essai incluant les données fonctionnelles:
 - les fréquences de résonance et l'amortissement, incluant les enregistrements de la recherche des fréquences de résonance;
 - le spectre de réponse incluant la comparaison du Spectre de Réponse Spécifié (SRS) et du Spectre de Réponse d'Essais (SRE) pour chaque axe;
 - les accélérogrammes de l'essai pour chaque axe;
 - une liste de toutes les anomalies, une documentation de toutes les dégradations;

- les données relatives aux vérifications fonctionnelles, mesurées avant et après l'essai, incluant leur comparaison;
 - quelques schémas de contrôle des contacts pendant l'essai par accélérogramme;
 - les photographies du montage d'essai et des points de mesure;
- f) les résultats et les conclusions.

La page de couverture du rapport d'essai doit contenir au moins les informations suivantes:

- le type et la désignation de l'objet soumis à essai;
- le niveau de sévérité;
- la classe d'acceptation;
- le nombre et les conditions des passages d'essai.

8.3 Rapport d'analyse lorsque l'analyse est une analyse numérique

Le rapport d'essai doit inclure ce qui suit:

- a) l'identification et la description de l'équipement à qualifier;
- b) les références d'essai sismique de l'appareillage et les données d'essai correspondantes;
- c) une justification du choix de la méthode de calcul;
- d) l'identification du logiciel informatique et les références de validation;
- e) une description du modèle (type d'éléments, taille du maillage, hypothèses,...);
- f) une liste des modes de fréquences propres dans la gamme de 1 Hz à 35 Hz (sauf pour la méthode statique);
- g) la validité du modèle et une déclaration de justification;
- h) la réponse de l'équipement pour le Spectre de Réponse Spécifié (SRS) spécifié;
- i) les forces de réaction du montage;
- j) les déviations calculées des raccordements, fixations et espaces;
- k) la performance de chaque dispositif, composant et accessoire, en termes de comportement mécanique et de manœuvrabilité dans des conditions sismiques;
- l) les résultats, les conclusions et une déclaration de qualification;
- m) les signatures (comme requis) et la date.

8.4 Rapport d'analyse lorsque l'analyse est effectuée par similitude

Le rapport d'essai doit inclure ce qui suit:

- a) l'identification et la description de l'équipement à qualifier;
- b) l'identification et la description de l'équipement de référence;
- c) la justification de la similitude;
- d) une comparaison de l'équipement à qualifier par rapport à l'équipement de référence: rigidité, dimensions, agencement, répartition des masses, sévérité sismique;
- e) la performance de chaque appareil, composant et accessoire, en termes de comportement mécanique et de manœuvrabilité dans des conditions sismiques;
- f) les résultats, les conclusions et une déclaration de qualification;
- g) les signatures (comme requis) et la date.

Annexe A (normative)

Caractérisation du spécimen d'essai pour analyse

A.1 Excitation à faible niveau

A.1.1 Généralités

La méthode utilise l'application d'une excitation à faible niveau du spécimen d'essai pour déterminer ses réponses propres.

A.1.2 Méthode d'essai

Il existe différentes méthodes d'essai:

- la recherche des résonances avec un essai de vibration sinusoïdale à balayage lent selon la CEI 60068-2-6,
Voir ISO 7626-2.

NOTE Lorsqu'on utilise un exciteur mobile, les expérimentateurs font attention à l'influence du poids des excitateurs mobiles. Le spécimen d'essai étant monté pour simuler les conditions de montage en service recommandées, plusieurs excitateurs mobiles sont fixés aux points du spécimen d'essai où ils provoquent au mieux ses divers modes de vibration.

- la mesure des fonctions de transfert aux points critiques de la structure en utilisant un essai d'impact,
Voir ISO 7626-5.
- la mesure de la réponse aux points critiques de la structure en utilisant un signal d'entrée aléatoire à large bande conformément à la CEI 60068-2-64.

Les données obtenues à partir des instruments de surveillance placés sur le spécimen d'essai sont utilisées pour analyser sa performance dynamique.

A.1.3 Analyse

Les réponses en fréquence obtenues à partir de l'essai sont utilisées pour déterminer les fréquences modales et les taux d'amortissement qui doivent être utilisés dans l'analyse numérique du spécimen d'essai indiquée en 6.2.

A.2 (Vide)

Annexe B (informative)

Critères d'adéquation sismique des ensembles d'appareillage sous enveloppe

B.1 Généralités

B.1.1 Combinaison de contraintes

La probabilité d'apparition d'un séisme du niveau de qualification sismique recommandé pendant la durée de vie des ensembles d'appareillage est faible; de plus la sollicitation sismique maximale lors d'un séisme naturel ne se produit que si les ensembles d'appareillage sont excités à leurs fréquences critiques avec une accélération maximale. Comme ceci ne dure que quelques secondes, une combinaison des plus grandes contraintes électriques et des contraintes liées à l'environnement conduit à une prudence irréaliste.

On peut considérer que les contraintes supplémentaires suivantes se produisent, sauf indication contraire:

- la pression interne assignée;
- les charges permanentes (charges mortes);
- les effets thermiques.

Il convient que la combinaison des charges soit effectuée par une analyse statique, en appliquant les forces dans la direction où elles se produisent.

B.1.2 Interaction du sol et de la structure du bâtiment

L'interaction du sol et de la structure du bâtiment peut être décrite s'il est souhaitable de calculer l'effet de leur présence. Les mesures qui peuvent être prises pour diminuer les interactions entre le sol et les structures des bâtiments sont les suivantes:

- centre de gravité plus bas des équipements;
- équipements légers;
- utilisation des fondations monolithiques ou des bâtiments parasismiques.

B.1.3 Limitations des déplacements

Des critères de limitation des déplacements de l'équipement peuvent être décrits comme suit:

- alignement des parties mobiles;
- fuite de gaz isolant;
- impact avec un équipement adjacent;
- réduction des distances diélectriques et endommagement de l'isolation;
- interconnexions de l'équipement sur les fondations avoisinantes.

B.2 Dispositions et pratiques d'installation recommandées

B.2.1 Fondations

Dans la mesure du possible, il est recommandé que tout équipement interconnecté soit placé sur une fondation monolithique pour atténuer les mouvements différentiels dus au séisme. Lorsque l'équipement interconnecté n'est pas situé sur la même fondation, il convient de tenir

compte des mouvements différentiels attendus entre équipements dus au mouvement des fondations.

On doit également tenir compte de l'interaction du sol sur les conduites souterraines pénétrant et sortant à travers les fondations. Si l'équipement est rigidement fixé sur des éléments de structure comme des murs ou des sols adjacents, la réponse et les déplacements relatifs de ces éléments peuvent être pris en compte.

B.2.2 Méthodes de fixation des équipements sur les fondations

Il est fortement recommandé qu'un équipement de grande taille et qu'un équipement avec des distances importantes entre la position des fixations soient ancrés sur des éléments en acier incorporés et fermement attachés aux éléments structurels dans le béton. L'emplacement et le type des fixations peuvent être représentés sur les dessins du fabricant. Toutes les fixations doivent résister aux efforts générés par le séisme. Les fixations métalliques apparentes doivent être protégées contre la corrosion.

Si des boulons sont utilisés pour la fixation d'un équipement, ils doivent être noyés dans le béton frais ou fixés au moyen de chevilles chimiques prévues pour trous percés dans le béton durci. L'utilisation de boulons ou d'ancrages qui sont placés dans des trous percés dans le béton durci n'est pas recommandée. Des boulons en acier doux ductile sont utilisés de préférence.

On doit tenir compte de toute répartition inégale des efforts sismiques dynamiques sur les boulons de fixation (en raison de la tolérance des trous des boulons, des moments de torsion ou de l'absence de contact des écrous). La valeur limite du couple de serrage des boulons de fixation, leurs dimensions et leurs positions doivent être indiquées sur les dessins de construction. De plus, la résistance et les spécifications des matériaux doivent être fournies.

Tous les systèmes d'ancrage doivent être conçus pour prendre en compte la traction, le cisaillement, la flexion, les efforts axiaux et toutes les combinaisons de ceux-ci exercées durant le niveau de séisme demandé. La résistance au cisaillement et à la traction de l'ancrage à l'intérieur de la fondation peut être supérieure à la résistance des boulons fixant l'équipement.

NOTE Voir [1].¹

B.2.3 Interconnexion aux équipements adjacents

Toutes les interconnexions entre les structures doivent être prévues pour s'adapter à tous les mouvements relatifs importants.

Structuralement et dynamiquement, des structures dissociées peuvent conduire à des déplacements relatifs importants. Les jonctions et les interconnexions doivent être suffisamment longues et flexibles pour permettre ces déplacements sans dommage. On doit prêter une attention particulière aux parties fragiles non ductiles comme les traversées en céramique et les isolateurs. En aucun cas les interconnexions électriques ou de structures ne doivent conduire à un raidissement brutal augmentant les mouvements et les tensions. De telles non linéarités créent des chocs conduisant à des efforts importants. Des recommandations doivent être données pour les changements des caractéristiques dynamiques des équipements résultant d'une partie utilisée, afin de réaliser l'interconnexion entre les équipements.

¹ Les chiffres entre crochets réfèrent à la bibliographie.

B.2.4 Utilisation de renforts sur la structure de l'appareillage

Le durcissement de l'équipement peut augmenter certaines de ses fréquences propres, en les faisant sortir de la plage critique d'énergie sismique. Des renforts diagonaux ou axiaux peuvent être utilisés pour rigidifier ou renforcer l'équipement. Lorsqu'on utilise des renforts, il convient de prêter une attention particulière aux aspects suivants:

- une structure boulonnée est recommandée dans la structure pour augmenter l'amortissement effectif aux niveaux d'effort élevé;
- des informations sur le moment de torsion correct de tous les boulons doivent être fournies, garantissant que les assemblages résisteront dynamiquement comme prévu;
- si une partie de la structure doit être fournie par l'utilisateur, le fabricant ou l'utilisateur ou les deux doivent alors fournir les informations nécessaires pour pouvoir déterminer facilement les caractéristiques statiques et dynamiques et les exigences relatives aux fondations.

Il convient que les exigences fondamentales suivantes sur les renforts puissent être prises en compte:

- les renforts doivent être beaucoup plus rigides que la structure pour que le renforcement soit efficace;
- le renfort ne doit pas se déformer ni présenter un comportement non linéaire brutal. En particulier, tout raidissement brusque quelles qu'en soient les circonstances doit être évité;
- une déformation permanente du renfort après un séisme est acceptable à condition qu'elle n'affecte pas le fonctionnement normal de l'ensemble.

Annexe C (informative)

Méthodes d'analyse dynamique

C.1 Généralités

Comme remarque générale préliminaire, il est nécessaire de vérifier l'adéquation du maillage des éléments finis au contenu en fréquence maximum du signal d'entrée (généralement 35 Hz). La taille du maillage doit être suffisamment fine pour permettre de reproduire les formes modales correspondant aux plus hautes fréquences prises en compte.

C.2 Analyse spectrale

Pour un accélérogramme de séisme donné, la réponse maximale d'un système générique élastique à un degré de liberté (caractérisé par une fréquence propre f et un amortissement critique β) peut être facilement évaluée de sorte qu'on peut obtenir une fonction de ces deux paramètres (f, β).

On définit comme Spectre de réponse en accélération d'un accélérogramme de séisme donné, la fonction $S_a(f, \beta)$ qui décrit l'accélération maximale du système générique à un degré de liberté pour une plage de fréquences donnée et de valeurs d'amortissement. Puisque la représentation modale d'un modèle élastique générique d'éléments finis est caractérisée par n vecteurs propres orthogonaux (n étant le nombre de modes) chacun représentant un système à un degré de liberté, le spectre de réponse en accélération fournit l'accélération maximale pour chaque vecteur propre. En connaissant l'accélération maximale de chaque vecteur propre (un système à un degré de liberté), on peut calculer les déplacements maximums, forces, etc.

Les quantités maximales pour le modèle complet sont ensuite calculées en combinant les quantités modales maximales appropriées à tous les modes calculés; et pour cette raison, la précision du calcul dépend d'un nombre suffisant de vecteurs propres.

Pour combiner les réponses spectrales modales maximales, la règle suivante est recommandée:

$$a_{\max} = \sqrt{\sum_{m=c1-c2-\dots} a_e^2 + \left(\sum_{c1} |a_e|\right)^2 + \left(\sum_{c2} |a_e|\right)^2 + \left(\sum_{c3} |a_e|\right)^2 + \dots}$$

où

a_{\max} est le résultat de combinaison;

m est le nombre de modes calculés;

a_e est la réponse maximale du mode générique;

$c1, c2, \text{ etc.}$ sont les groupes de modes dont les fréquences sont à moins de 10 %.

Cette règle combine tous les modes «distants» et les groupes de modes par l'intermédiaire de la règle de la racine carrée de la somme des carrés (SRSS). Dans le groupe de modes générique, les quantités modales sont combinées en additionnant leur valeur absolue.

Il convient d'inclure un nombre suffisant de modes (masse modale) pour garantir une représentation précise de la réponse dynamique de structures ainsi que des efforts au niveau des supports. Le critère d'acceptation du nombre de modes dans une direction particulière

doit être tel que la masse cumulée des modes considérés soit au moins égale à 90 % de la masse réelle.

Si cette masse n'atteint pas 90 % dans la plage de fréquences jusqu'à 35 Hz, cela signifie que le modèle par éléments finis possède plusieurs fréquences de résonance au-dessus de 35 Hz et on peut tenir compte des effets des entrées orthogonales comme suit:

- déterminer la masse effective restante dans une direction donnée,
- appliquer à chaque composant une force statique égale à la masse du composant multipliée par la masse restante multipliée par l'Accélération de Période Nulle (APN),
- calculer les contraintes, les réactions et ainsi de suite,
- combiner pour chaque direction les contraintes, réactions et ainsi de suite calculées lors de l'analyse dynamique avec celles calculées de l'analyse ci-dessus en utilisant la règle de la SRSS décrite ci-dessous.

Lorsqu'une excitation est appliquée sur plusieurs axes orthogonaux (excitation biaxiale ou triaxiale) les réponses appropriées à une direction d'excitation différente doivent également être combinées. Il convient d'effectuer cette combinaison en suivant la règle de la SRSS.

$$A_{\max} = \sqrt{\sum_{j=1,3} a_{\max}^2} \quad \text{où } j = 1,3 \text{ sont les directions d'excitation.}$$

Lorsque les résultats dynamiques calculés avec une analyse spectrale doivent être combinés avec des résultats statiques (généralement des charges mortes), la méthodologie suivante est recommandée:

Pour les déplacements, vitesses, accélérations, forces et moments, il convient d'obtenir le résultat final en additionnant les résultats issus du calcul statique avec ceux issus de l'analyse spectrale (sans signe) multipliés par le signe des résultats statiques. Pour les contraintes, il est recommandé de combiner les valeurs statiques et les valeurs d'analyse spectrale de toutes les composantes du tenseur de contrainte, en additionnant chaque composant du tenseur de contrainte statique avec le composant correspondant du tenseur de contrainte issu de l'analyse spectrale, multipliée par le signe du tenseur statique.

C.3 Analyse par accélérogrammes

La méthode d'analyse par accélérogrammes inclut un découpage du temps par paliers; les équations dynamiques du modèle sont résolues pour chaque pas temporel, en tenant compte de la masse, de la rigidité, des forces d'amortissement et des forces externes appliquées.

Cette méthode nécessite en entrée l'utilisation d'accélérogrammes synthétiques compatibles avec le SRS: si ceux utilisés lors des essais sur table vibrante sont disponibles ils peuvent être utilisés. Il est recommandé d'utiliser au moins trois accélérogrammes synthétiques compatibles différents car l'utilisation d'un seul accélérogramme n'est pas suffisante pour un objectif de qualification.

Après analyse, on recherche les grandeurs maximales puisqu'il s'agit d'une étude dynamique de structure.

L'analyse par accélérogrammes pour les modèles élastiques linéaires (la seule autorisée dans la présente norme) peut être effectuée en utilisant soit l'analyse transitoire modale avec «*m*» équations modales (*m* étant le nombre de vecteurs propres utilisés), soit l'analyse transitoire directe avec le jeu complet de «*n*» équations (*n* étant le nombre de degrés de liberté du modèle par éléments finis).

L'analyse transitoire modale utilise la même représentation modale que le modèle par éléments finis utilisé pour l'analyse spectrale. Par analogie avec l'analyse spectrale, il est important de respecter un pourcentage minimum de la masse participante (90 %) pour chaque direction d'excitation (voir C.2). Un amortissement peut être appliqué comme amortissement modal, en sélectionnant une valeur pour chaque mode.

Une analyse transitoire directe résout directement les « n » équations de mouvement du modèle par éléments finis. Puisque l'on n'utilise aucune représentation modale, le contrôle de la masse participante n'est pas un problème. L'amortissement peut être défini en utilisant une matrice d'amortissement proportionnelle à la masse et/ou à la rigidité (amortissement de Rayleigh) correspondant à un pourcentage d'amortissement qui n'est pas constant sur la plage de fréquences. Cela doit être réalisé avec beaucoup d'attention.

Annexe D (informative)

Accélérations crête attendues du sol pour différentes échelles de séismes

D.1 Zones sismiques

Les zones sismiques sont définies dans une carte mondiale des risques naturels de la compagnie d'assurance Munich Re.

Dans le Tableau D.1 suivant sont montrées différentes zones sismiques.

Table D.1 – Echelles d'intensité et de magnitude des zones sismiques

Earthquake Zones *	Earthquake Intensity Scales						Earthquake Magnitude Scale	
World Map of Natural Hazards (Munich Re Group)	MM 1956	Descriptive term	Acceleration % g (g = 9.81 m/s ²)	EMS 1992	RF 1883	JMA 1951	Magnitude**	According to Richter (1956) Log ₁₀ E = 11.8 + 1.5 M
Zone 0	I	Imperceptible	< 0.1				1.0-3.0	E = energy released (in erg); to be multiplied by 32 for each full M grade M = Richter Magnitude (up to M ~ 9.5)
	II	Very slight	0.1-0.2	II	II	I	3.0-3.9	
	III	Slight	0.2-0.5		III	III	4.0-4.9	
	IV	Moderate	0.5-1	IV	IV	II	5.0-5.9	In addition to M, effects observed on the surface (-> intensities) depend mainly on the depth of and the distance from the focus, the duration of the earthquake and the prevailing subsoil conditions.
	V	Rather strong	1-2	V	V	III		
Zone 1	VI	Strong	2-5	VI	VI	IV	6.0-6.9	7.0 and higher
Zone 2	VII	Very strong	5-10	VII	VII	V		
Zone 3	VIII	Destructive	10-20	VIII	VIII			
Zone 4	IX	Devastating	20-50	IX	IX	VI		
	X	Annihilating	50-100 (-1g)	X				
	XI	Disaster	1-2g	XI	X			
	XII	Major disaster	>2g	XII		VII		

MM: 1956 Modified Mercalli
EMS: 1992 European Macroseismic Scale (Improvement of Medwedew-Sponheur-Karnik, 1964)
RF: 1883 Rossi-Forel
JMA: 1951 Japan Meteorological Agency

* Probable maximum intensity (MM: Modified Mercalli scale) with an exceedance probability of 10% in 50 years (equivalent to a "return period" of 475 years) for medium subsoil conditions

** according USGS - United States Geological Survey

Légende

Anglais	Français
Earthquake Zones*	Zones sismiques*
Earthquake Intensity Scales	Echelles d'intensité sismique
Earthquake Magnitude Scale	Échelle de magnitude sismique
World Map of Natural Hazards (Munich Re Group)	Carte mondiale des risques naturels (Groupe Munich Re)
Zone 0	Zone 0
Zone 1	Zone 1
Zone 2	Zone 2
Zone 3	Zone 3
Zone 4	Zone 4
Descriptive term	Description
Imperceptible	Imperceptible

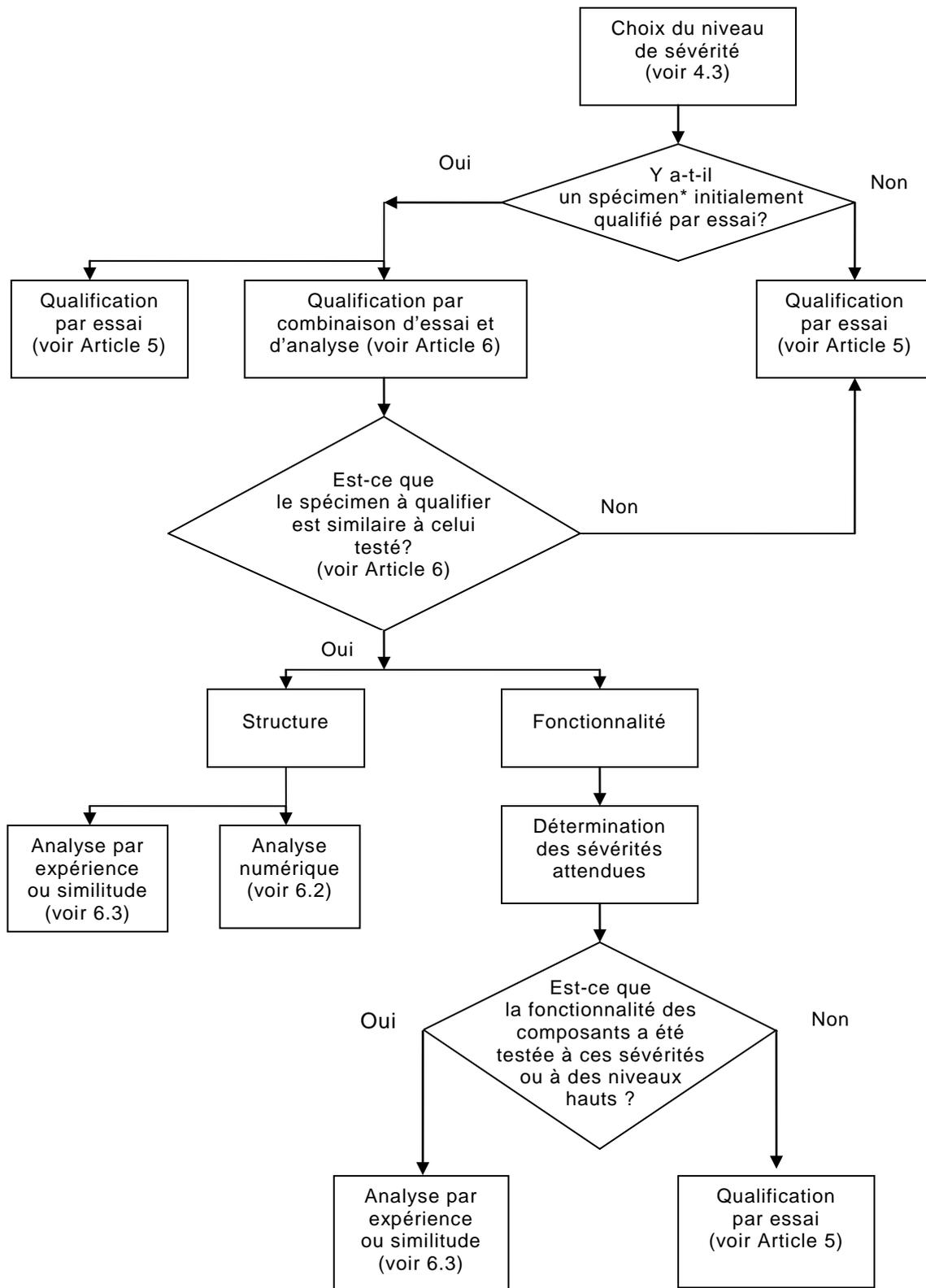
Anglais	Français
Very slight	Très léger
Slight	Léger
Moderate	Modéré
Rather strong	Assez fort
Strong	Fort
Very strong	Très fort
Destructive	Destructeur
Devastating	Dévastateur
Anihilating	Annihilation
Disaster	Désastre
Major disaster	Désastre majeur
Acceleration % g	Accélération % g
Magnitude **	Magnitude **
According to Richter (1956)	Selon Richter (1956)
E = Energy released (in erg): to be multiplied by 32 for each full M grade M = Richter Magnitude (up to M ~ 9.5)	E = Énergie libérée (en erg) à multiplier par 32 pour chaque degré M complet M = Magnitude de Richter (jusqu'à M ~ 9.5)
In addition to M effects observed on the surfaces (-> intensities) depend mainly on the depth of and the distance from the focus, the duration of the earthquake and the prevailing subsoil conditions	Outre les effets de M observés sur les surfaces (-> intensités) dépendent principalement de la profondeur et de la distance par rapport au foyer, de la durée du séisme et des conditions prédominantes du sol
7.0 and higher	7,0 et plus
MM: 1956 Modified Mercalli	MM: 1956 Mercalli modifié
EMS: 1992 European Macroseismic Scale (Improvement of Medwedew-Sponheur-Kamik, 1964)	EMS: 1992 Échelle macrosismique européenne (Amélioration de Medwedew-Sponheur-Kamik, 1964)
RF: 1883 Rossi-Forel	RF: 1883 Rossi-Forel
JMA: 1951 Japan Meteorological Agency	JMA: 1951 Japan Meteorological Agency
* Probable maximum intensity (MM: Modified Mercalli Scale) with an exceedance probability of 10 % in 50 years (equivalent to a "return period" of 475 years) for medium subsoil conditions	* Intensité maximale probable (MM: Échelle de Mercalli modifiée) avec dépassement de probabilité de 10 % en 50 ans (équivalente à une «période de retour» de 475 ans) dans des conditions moyennes du sous-sol
** According USGS – United States Geological Survey	** Selon l'USGS – United States Geological Survey

NOTE Voir [2].

D.2 (Vide)

Annexe E
(informative)

Logigramme du processus de qualification



* la référence est le spécimen testé initialement sous les contraintes sismiques.

NOTE Dans tous les cas, la qualification par test est une solution possible.

Bibliographie

- [1] IEEE 693: 2005, *IEEE Recommended Practices for Seismic Design of Substations* (disponible en anglais seulement)
 - [2] USGS United States Geological Survey, disponible à <http://earthquake.usgs.gov/learning/topics/mag_vs_int.php> (disponible en anglais seulement)
 - [3] CEI 60068-2-47, *Essais d'environnement – Partie 2-47: Essais – Fixation de spécimens pour essais de vibrations, d'impacts et autres essais dynamiques*
 - [4] ISO 7626-1, *Vibrations et chocs mécaniques – Détermination expérimentale de la mobilité mécanique – Partie 1: Termes et définitions fondamentaux et spécification des transducteurs*
 - [5] ISO 7626-2, *Vibrations et chocs – Détermination expérimentale de la mobilité mécanique – Partie 2: Mesurages avec utilisation d'une excitation de translation en un seul point, au moyen d'un générateur de vibrations solidaire de ce point*
 - [6] ISO 7626-5, *Vibrations et chocs – Détermination expérimentale de la mobilité mécanique – Partie 5: Mesurages à partir d'une excitation par choc appliquée par un excitateur non solidaire de la structure*
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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