

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60068-3-8

Première édition
First edition
2003-08

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Essais d'environnement –

**Partie 3-8:
Documentation d'accompagnement
et lignes directrices –
Sélection d'essais de vibrations**

Environmental testing –

**Part 3-8:
Supporting documentation and guidance –
Selecting amongst vibration tests**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60068-3-8:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

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

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60068-3-8

Première édition
First edition
2003-08

**PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION**

Essais d'environnement –

**Partie 3-8:
Documentation d'accompagnement
et lignes directrices –
Sélection d'essais de vibrations**

Environmental testing –

**Part 3-8:
Supporting documentation and guidance –
Selecting amongst vibration tests**

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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 photo-copie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

S

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
3 Termes et définitions	12
4 Description des méthodes d'essais vibratoires	14
4.1 Généralités	14
4.2 Méthodes d'essai	14
4.3 Essais accélérés	18
5 Environnement vibratoire du spécimen	18
5.1 Généralités	18
5.2 Collecter l'information, préparer la décision	18
5.3 Définition des conditions dynamiques	20
6 Estimation des conditions dynamiques réelles rencontrées par le matériel au long de sa vie	20
6.1 Généralités	20
6.2 Mesure des conditions dynamiques	20
6.3 Analyse des données	22
7 Choix d'une méthode d'essai	30
7.1 Généralités	30
7.2 Essai sinus	32
7.3 Essais aléatoires	32
7.4 Essais de type combiné	34
8 Etude et recherche des fréquences critiques du spécimen	34
8.1 Généralités	34
8.2 Objectifs	36
8.3 Excitation sinusoïdale	36
8.4 Excitation aléatoire	38
8.5 Dépistage des erreurs	38
8.6 Critères d'acceptation/de rejet	38
8.7 Renseignements devant figurer dans la spécification particulière	42
Bibliographie	44
Figure 1 – Densité de probabilité d'un signal sinusoïdal à fréquence unique	26
Figure 2 – Densité de probabilité d'un signal composé sinus et aléatoire	26
Figure 3 – Fonction d'autocorrélation de différents signaux	28
Tableau 1 – Exemples d'environnements vibratoires et de méthodes d'essai recommandées	30
Tableau 2 – Méthode recommandée pour l'investigation en réponse	42

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	13
4 Description of vibration test methods.....	15
4.1 General.....	15
4.2 Test methods	15
4.3 Accelerated testing.....	19
5 Vibration environment of a specimen.....	19
5.1 General.....	19
5.2 Collecting information, preparing a decision	19
5.3 Definition of dynamic conditions	21
6 Estimation of 'real life' dynamic conditions for the specimen.....	21
6.1 General.....	21
6.2 Measurement of dynamic conditions.....	21
6.3 Data analysis	23
7 Selection of test method	31
7.1 General.....	31
7.2 Sine testing	33
7.3 Random testing	33
7.4 Mixed mode testing	35
8 Vibration response investigation of the specimen	35
8.1 General.....	35
8.2 Aims, purposes	37
8.3 Sinusoidal excitation	37
8.4 Random excitation.....	39
8.5 Problem investigation (troubleshooting).....	39
8.6 Survival pass/fail criterion	39
8.7 Information to be given in the relevant specification	43
Bibliography.....	45
Figure 1 – Probability density of a single frequency sinusoidal signal.....	27
Figure 2 – Probability density of a mixture of sine and random signals.....	27
Figure 3 – Autocorrelation functions for various signals	29
Table 1 – Examples of vibration environment and recommended test method	31
Table 2 – Recommended method for response investigation.....	43

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

Partie 3-8: Documentation d'accompagnement et lignes directrices – Sélection d'essais de vibrations

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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 et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente, les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60068-3-8 a été établie par le comité d'études 104 de la CEI: Conditions, classification et essais d'environnement.

Le texte de cette norme est basé sur les documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
104/308/FDIS	104/324/RVD

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

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

Elle a le statut d'une publication fondamentale de sécurité conformément au Guide CEI 104.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ENVIRONMENTAL TESTING –

**Part 3-8: Supporting documentation and guidance –
Selecting amongst vibration tests**

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, and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60068-3-8 has been prepared by IEC technical committee 104: Environmental conditions, classification and methods of test.

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

FDIS	Report on voting
104/308/FDIS	104/324/RVD

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

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

It has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2007. A cette date, la publication sera

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

La CEI 60068 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Essais d'environnement*:

Partie 1: Généralités et guide

Partie 2: Essais

Partie 3: Documentation d'accompagnement et guide/lignes directrices

Partie 4: Renseignements destinés aux rédacteurs de spécifications – Résumé d'essais

Partie 5: Guide pour la rédaction des méthodes d'essais

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-3-8:2003

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2007. At this date, the publication will be

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

IEC 60068 consists of the following parts, under the general title *Environmental testing*:

Part 1: General and guidance

Part 2: Tests

Part 3: Supporting documentation and guidance

Part 4: Information for specification writers – Test summaries

Part 5: Guide to drafting of test methods

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-3-8:2003

INTRODUCTION

Les composants, équipements et produits électrotechniques en général, et indiqués comme «spécimens» dans la suite du présent document, sont soumis à différents types de vibration à l'occasion de leur fabrication, de leur transport ou de leur utilisation. Ces différents environnements vibratoires sont répartis en plusieurs classes suivant leur caractère stationnaire ou transitoire dans la série de la CEI 60721-3. Les normes de la série CEI 60068-2 décrivent les méthodes d'essais associées respectivement aux vibrations à caractère stationnaire ou transitoire. Ces normes d'essai en environnement décrivant les méthodes d'essais à respecter pour des vibrations stationnaires seront au nombre de trois dans la série 60068-2.

Partie 2-6 Essai Fc: Vibrations sinusoïdales

Partie 2-64 Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande (asservissement numérique) et guide

Partie 2-80 Essai F-: Essai combiné¹

¹ A l'étude.

INTRODUCTION

Components, equipment and other electrotechnical products, hereinafter called specimens, can be subjected to different kinds of vibration during manufacture, transportation or in service. In the IEC 60721-3 standards, those different vibration environments are tabulated into classes characterizing stationary and transient vibration conditions. The standards in the IEC 60068-2 series describe methods for testing with stationary or transient vibration. There will be three standards in the IEC 60068-2 series for environmental testing that specify test methods employing stationary vibration:

Part 2-6 Test Fc: Vibration (sinusoidal),

Part 2-64 Test Fh: Vibration, broad-band random (digital control) and guidance, and

Part 2-80 Test F-: Mixed mode testing¹

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-3-8:2003

¹ Under consideration.

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

Partie 3-8: Documentation d'accompagnement et lignes directrices – Sélection d'essais de vibrations

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60068 fournit les lignes directrices pour la sélection parmi les méthodes d'essais Fc de vibrations stationnaires sinusoïdales, Fh aléatoires et Fx composites de la série 60068-2. Ces différentes méthodes d'essais quasi stationnaires ainsi que leur objet sont brièvement décrites à l'Article 4. Les méthodes d'essais en transitoire ne sont pas incluses.

Lors de la réalisation d'essais en vibration, il convient de connaître les conditions d'environnement, et spécialement les conditions dynamiques du spécimen en essai. La présente norme aide à réunir l'information relative aux conditions d'environnement (Article 5), à estimer ou à mesurer les conditions dynamiques (Article 6) et donne des exemples afin d'illustrer les choix à réaliser pour la plupart des méthodes d'essais applicables en environnement vibratoire. A partir des conditions d'environnement, la méthodologie de choix de l'essai approprié est fournie. Puisque les conditions d'environnement vibratoire naturelles sont de nature aléatoire, il est recommandé que les essais en vibrations aléatoires soient généralement, les méthodes retenues (voir Tableau 1, Article 7).

Les méthodes décrites ci-après peuvent être utilisées pour examiner la réponse vibratoire du spécimen en essai avant, pendant et après un essai de vibrations. Le choix de la méthode appropriée est décrit à l'Article 8 et présenté au Tableau 2.

Les spécificateurs trouveront dans la présente norme les informations relatives aux méthodes d'essais vibratoires et les lignes directrices pour choisir parmi elles la méthode appropriée. Pour choisir les paramètres ou les sévérités relatives à l'une de ces méthodes, il y a lieu de se reporter aux références normatives.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants sont indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seules les éditions citées sont applicables. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence (et ses éventuels amendements) s'applique.

CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Première partie: Généralités et guide*

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

CEI 60068-2-64, *Essais d'environnement – Partie 2-64: Méthodes d'essai – Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande (asservissement numérique) et guide*

CEI 60068-2-80, *Essais d'environnement – Partie 2-80: Essais – Essai F-: Essai combiné²*

CEI 60721-3 (toutes les parties), *Classification des conditions d'environnement – Partie 3: Classification des groupements des agents d'environnement et de leurs sévérités*

CEI 60721-4 (toutes les parties) *Classification des conditions d'environnement – Partie 4: Guide pour la corrélation et la transformation des classes de conditions d'environnement de la CEI 60721-3 en essais d'environnement de la CEI 60068-2*

² A l'étude.

ENVIRONMENTAL TESTING –

Part 3-8: Supporting documentation and guidance – Selecting amongst vibration tests

1 Scope

This part of IEC 60068 provides guidance for selecting amongst the IEC 60068-2 stationary vibration test methods F_c sinusoidal, F_h random and $F(x)$ Mixed mode vibration. The different steady-state test methods and their aims are briefly described in Clause 4. Transient test methods are not included.

For vibration testing, the environmental conditions, especially the dynamic conditions for the specimen, should be known. This standard helps to collect information about the environmental conditions (Clause 5), to estimate or measure the dynamic conditions (Clause 6) and gives examples to enable decisions to be made on the most applicable environmental vibration test method. Starting from the condition, the method of selecting the appropriate test is given. Since real life vibration conditions are dominated by vibration of a random nature, random testing should be the commonly used method, see Table 1, Clause 7.

The methods included hereafter may be used to examine the vibration response of a specimen under test before, during and after vibration testing. The selection for the appropriate excitation method is described in Clause 8 and tabulated in Table 2.

In this standard specification, writers will find information concerning vibration test methods and guidance for their selection. For guidance on test parameters, or severities of one of the test methods, reference should be made to the normative references.

2 Normative references

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

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

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

IEC 60068-2-64, *Environmental testing – Part 2-64: Test methods – Test F_h : Vibration, broad-band random (digital control) and guidance*

IEC 60068-2-80, *Environmental testing – Part 2-80: Tests – Test F –: Mixed mode testing*²

IEC 60721-3 (all parts), *Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities*

IEC 60721-4 (all parts), *Classification of environmental conditions – Part 4: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068-2*

² Under consideration.

Guide CEI 104:1997, *Elaboration des publications de sécurité et utilisation des publications fondamentales de sécurité et publications groupée de sécurité*

ISO 2041, *Vibrations et chocs – Vocabulaire*

ISO 5348, *Vibrations et chocs mécaniques – Fixation mécanique des accéléromètres*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions utilisés sont généralement définis dans l'ISO 2041, dans la CEI 60068-1, la CEI 60068-2-6 ou la CEI 60068-2-64. Lorsque, pour des raisons pratiques, la définition de l'un des termes de ces documents est donnée dans la présente norme, l'origine en est indiquée et les écarts aux définitions de ces normes sont également précisés.

3.1

conditions dynamiques

tous les paramètres décrivant l'environnement vibratoire du spécimen

3.2

vibration stationnaire

catégorie de vibrations dont tous les paramètres vibratoires associés (statistiques et spectraux) sont constants dans le temps

3.3

balayage en fréquence

évolution de la fréquence d'excitation pendant l'essai sinus

NOTE Pour les définitions complémentaires des essais sinus, voir la CEI 60068-2-6.

3.4

spectre linéaire

type de spectres utilisé pour les signaux périodiques, généralement calculés à l'aide d'algorithme de transformation de Fourier rapide (FFT), et dont les unités sont par exemple $\text{m/s}^2 \times \text{s}$ ou g/Hz ou $\text{g} \times \text{s}$

[IES-RP-DET 012.1]

3.5

densité spectrale d'accélération

DSA

type de spectres utilisé pour les signaux aléatoires stationnaires, généralement calculés à partir du carré de l'amplitude des transformations de Fourier discrètes (TFD): moyenne des carrés des valeurs de la partie d'un signal d'accélération en sortie d'un filtre à bande étroite de fréquence centrale déterminée, par unité de largeur de bande, lorsque cette largeur de bande tend vers zéro et que la durée prise en compte pour le calcul de la moyenne tend vers l'infini, appelé parfois autospectre, et dont l'unité est $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ ou g_n^2/Hz

[ISO 2041, modifiée]

3.6

autocorrélation

mesure statistique du degré avec lequel une partie du signal est reliée avec une autre partie du même signal (décalée d'un temps donné)

NOTE La transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation fournit l'autospectre ou DSA, dont l'unité est un rapport compris entre -1 et +1.

IEC Guide 104:1997, The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications

ISO 2041, *Vibration and shock – Vocabulary*

ISO 5348, *Mechanical vibration and shock – Mechanical mounting of accelerometers*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, terms and definitions used are generally defined in ISO 2041, in IEC 60068-1, IEC 60068-2-6 or IEC 60068-2-64. Where, for the convenience of the reader, a definition from one of those sources is included here, the derivation is indicated and departures from the definitions in those sources are also indicated.

3.1

dynamic conditions

all parameters that describe the vibration environment for a specimen

3.2

stationary vibration

type of vibration with all the vibration-related parameters (statistical and spectral) constant over time

3.3

frequency sweep

change of exciting frequency during sine testing

NOTE For further definitions for sine testing, see IEC 60068-2-6.

3.4

linear spectrum

type of spectrum used for periodic signals, usually calculated with fast Fourier transformation (FFT) algorithms, units being, for example, $\text{m/s}^2 \times \text{s}$ or g/Hz or $\text{g} \times \text{s}$.

[IES-RP-DET 012.1]

3.5

acceleration spectral density

ASD

type of spectrum used for stationary random signals, usually calculated using squared discrete Fourier transformations (DFT): mean-square value of that part of an acceleration signal passed by a narrow-band filter of a centre frequency, per unit bandwidth, in the limit as the bandwidth approaches zero and the averaging time approaches infinity, sometimes called autospectrum, the unit being $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ or g_n^2/Hz

[ISO 2041, modified]

3.6

autocorrelation

statistical measure of the degree of which one part of a signal is related to another part (offset by a given time) of the same signal

NOTE The Fourier transform of the autocorrelation function gives the autospectrum or ASD, the unit being a ratio from -1 to $+1$.

3.7

degrés de liberté statistique

DDL

pour l'estimation de la densité spectrale d'accélération de données aléatoires à l'aide d'une technique de moyennes temporelles, nombre réel de degrés de liberté statistiques dérivé de la résolution en fréquence et de la durée réelle sur laquelle est calculée la moyenne

[CEI 60068-2-64, 4.3.5, ISO 2041, modifiée]

3.8

fréquence critique

fréquences pour laquelle:

- apparaît un mauvais fonctionnement et/ou une altération des propriétés du spécimen, dus aux vibrations et/ou
- se produisent des résonances mécaniques et/ou d'autres manifestations d'une réponse, par exemple des martèlements

4 Description des méthodes d'essais vibratoires

4.1 Généralités

Les essais en environnement sont utilisés pour simuler en laboratoire les effets de l'environnement vibratoire sur le matériel en situation réelle. Les essais vibratoires exploitent différents signaux d'excitation en entrée du spécimen, par exemple, sur un générateur de vibrations. Les méthodes d'essais se caractérisent par ces signaux d'entrée.

4.2 Méthodes d'essai

Les vibrations sinusoïdales et aléatoires correspondent à des phénomènes physiques différents et produisent des effets différents sur les matériels. Il convient que le spécificateur sache toujours qu'en raison de ces différences physiques, il n'existe aucune équivalence stricte entre les essais de vibrations sinusoïdale et aléatoire. Il est donc fortement recommandé de ne pas tenter de transcrire des sévérités de vibration sinusoïdale en vibration aléatoire ou vice versa.

Une brève description des différentes méthodes d'essais vibratoires est fournie.

4.2.1 Essai sinus

Les essais sinus (CEI 60068-2-6) utilisent un signal sinus à fréquence et amplitude constantes ou variables. Une unique fréquence est appliquée à chaque instant. Les conditions d'essai incluent la plage (bande) des fréquences ou la fréquence constante, les amplitudes des vibrations et la durée de l'essai.

Les vibrations sinusoïdales ne se rencontrent dans l'environnement réel que rarement, sinon jamais, avec une fréquence unique. Ce peut être le cas même à l'occasion de mesures d'accélération directement sur une machine tournante. En pratique, les tolérances et les jeux, par exemple sur les engrenages et les paliers, résultent généralement en une légère évolution en fréquence. Certaines formes de vibrations aléatoires sont également le résultat des propriétés aléatoires des machines tournantes.

Une vibration sinusoïdale peut être décrite de manière déterministe. Elle suit une allure déterminée, de telle sorte que l'on peut prédire la valeur de l'accélération à n'importe quelle date dans le futur à partir de sa connaissance dans le passé.

3.7

statistical degrees of freedom DOF

for the estimation of the acceleration spectral density of random data with a time-averaging technique, effective number of statistical degrees of freedom derived from the frequency resolution and the effective averaging time

[IEC 60068-2-64, 4.3.5, ISO 2041, modified]

3.8

critical frequency

frequencies at which

- malfunctioning and/or deterioration of performance of the specimen, which are dependent on vibration are exhibited, and/or
- mechanical resonances and/or other response effects occur, for example chatter

4 Description of vibration test methods

4.1 General

Environmental testing is used to simulate in a laboratory the effects of a real life vibration environment. Vibration testing uses different input signals to excite the specimen, for example on a vibration table. The test methods are characterized by those input signals.

4.2 Test methods

Sine and random vibration are different physical processes and produce different effects on the specimen. The specification writer should be aware that, due to the physically different processes there is no precise equivalence between sine and random vibration testing. It is strongly recommended not to attempt to transfer severities from sine to random or vice versa.

A brief description of the various vibration test methods is given.

4.2.1 Sine testing

Sine testing (IEC 60068-2-6) uses a sinusoidal signal with constant or changing frequency and amplitude. Only one frequency is applied at any instant in time. The test conditions include frequency range (bands) or fixed frequencies, vibration amplitudes and test duration.

Sinusoidal vibration rarely, if ever, occurs as a single frequency vibration in isolation in a real life environment. This can be the case even when measuring the acceleration directly on rotating machinery. Practical tolerances and clearances, e.g. in gears and bearings, generally result in a small change in frequency. Some form of random vibration is also produced by random properties of the rotating machinery.

Sinusoidal vibration may be described as deterministic. It follows an established pattern so that the value of the vibration at any designated future time is completely predictable from the past history.

Ce type d'essai peut être utile dans le domaine de la détermination de la date au moment de la défaillance lors d'un balayage en fréquence, balayage pendant lequel il est alors possible d'identifier la fréquence particulière recherchée, ce qui ne serait que difficilement le cas si l'essai réalisé était de type aléatoire. Néanmoins, en comparaison avec les essais aléatoires, ce type d'essai nécessite plus de temps avant rupture; en effet chaque fréquence de résonance n'est excitée que brièvement lors du balayage. Bien qu'une fréquence unique soit appliquée à chaque instant, un balayage lent permet aux fréquences particulières de résonance du matériel d'atteindre leur plein niveau d'excitation. Ce type d'essai autorise également l'identification au stade de la conception/du développement des fréquences de résonances potentiellement dommageables pour le matériel.

Une autre utilisation des essais sinusoïdaux peut consister à réaliser «l'essai par palier»:

- a) à une fréquence connue, ou
- b) aux fréquences de résonance du spécimen.

4.2.2 Essais aléatoires

Une excitation aléatoire utilise un signal d'entrée stochastique et aléatoire qui comprend à chaque instant toutes les fréquences contenues dans une plage spécifiée (largeur de bande) (CEI 60068-2-64). Les valeurs instantanées sont distribuées suivant une loi normale (de Gauss). La distribution sur la plage de fréquences est spécifiée par une densité spectrale d'accélération (DSA).

La vibration aléatoire est le type d'excitation le plus couramment rencontré en environnement réel. Sa valeur instantanée à un instant futur ne peut pas être déduite de ses valeurs passées et ne peut donc être estimée que sur une base probabiliste. Cette propriété statistique s'applique à tous les résultats de calculs utilisant les vibrations aléatoires, par exemple les calculs de fatigue, de contrainte, etc.

Par opposition aux essais sinus, une vibration aléatoire sollicite les résonances de manière continue sur toute la durée de l'essai, mais pas à leur puissance maximale. La plupart des vibrations aléatoires appliquées en laboratoires contiennent des niveaux à trois écarts types, ce qui signifie que les valeurs instantanées du signal d'excitation dans la plage de fréquences concernée peuvent être comprises entre zéro et trois fois la valeur efficace totale du signal. Une autre différence notable est que les excitations aléatoires peuvent générer un certain nombre d'inversions de contrainte, positivement et négativement en suivant les directions, avec des changements de signes des contraintes. Cette propriété peut influencer l'accumulation des dommages en fatigue et donc la durée prévisible avant rupture.

4.2.3 Essai combiné

L'essai combiné (CEI 60068-2-80) combine des signaux sinusoïdaux et aléatoires. Les environnements dont l'origine provient de sources différentes peuvent ainsi être simulés. En fonction du type des sources à combiner, ces essais sont dits:

- sinus sur bruit, (SsB);
- bruit sur bruit (BsB);
- sinus sur bruit sur bruit (SsBsB).

NOTE Le choc sur bruit (phénomène transitoire appliqué simultanément à une vibration aléatoire comme c'est le cas pour le tir canon) n'est pas inclus dans la présente norme.

Les essais en mode composite combinent les avantages des essais sinus et aléatoires et autorisent un rendu de l'environnement réel avec une meilleure approximation. En outre, ces essais permettent d'appliquer une meilleure personnalisation des essais en limitant les phénomènes de sous-test ou de sur-test qui peuvent avoir des conséquences catastrophiques. Leur inconvénient principal réside dans leur complexité accrue à comprendre et à spécifier, et dans la complexité à contrôler et à vérifier l'essai.

An area where this type of testing can be advantageous is in the timing of a failure during a frequency sweep, where it may be possible to associate it with a particular frequency that, otherwise, may not be readily obvious if applying a random test. However, compared to random vibration, it tends to take longer to produce failures because it excites each resonance only briefly during a sweep. Although only one frequency is applied at any one instant, it does allow a particular resonance of the specimen to potentially build to its full amplitude, if the sweep-rate is low enough. It can also be used for establishing possible damaging resonances particularly during design/development testing.

An additional use of sinusoidal vibration testing may be the frequency 'dwell test' either at

- a) a known forcing frequency, or
- b) at the resonance frequencies of the specimen.

4.2.2 Random testing

Random excitation uses a stochastic, random input signal, which includes all frequencies in a specified frequency range (bandwidth) at all times (IEC 60068-2-64). The instantaneous values are distributed normally (Gaussian). The distribution over the frequency range is specified by an acceleration spectral density (ASD) curve.

Random vibration is the most commonly occurring type of excitation seen in a real life environment. Its future instantaneous values are unpredictable from past time history and can, therefore, only be predicted on the basis of probability. In fact, this property is applicable to most calculations associated with random vibration, for example, fatigue, stress reversals and so on.

In contrast to sinusoidal testing, random vibration excites a resonance continuously throughout the test duration, although not to maximum value. Most random vibration signals in the test laboratory contain three sigma levels which means that the instantaneous value of excitation in the test frequency range could range between zero and three times the overall r.m.s. value of the signal. A further difference to consider with random excitation is that there are a number of stress reversals that can occur, in either the positive or negative direction, in between a zero crossing. This property can influence the fatigue damage accumulation and hence the life expectancy to failure.

4.2.3 Mixed mode testing

Mixed mode testing (IEC 60068-2-80) combines sinusoidal and random signals. Environments with more than one vibration source can be simulated. Depending on the type of combined vibration sources, the tests are called:

- sine on random (SoR);
- random on random (RoR);
- sine on random on random (SoRoR).

NOTE Shock on random (transient on stochastic vibration like gunfire test) is not included in this standard.

Mixed mode testing combines the advantages of both sine and random testing, permitting a closer approximation to a real life environment. Furthermore, it does permit a greater degree of test tailoring to be performed and it is equally important to minimize the degree of under- or over-testing since either can have catastrophic consequences. Its major disadvantage is the increase in complexity in understanding specifying, controlling and verifying the test.

4.3 Essais accélérés

Il est parfois nécessaire, par exemple pour limiter la durée de l'essai, d'accroître le niveau de l'essai au-delà des conditions réelles. En augmentant les niveaux vibratoires, on augmente de fait les contraintes mécaniques appliquées au spécimen et on réduit la durée nécessaire à la simulation des contraintes en fatigue associées à la vie réelle du spécimen. En règle générale, les essais accélérés sont accessibles au travers de toutes les méthodes d'essais décrites précédemment.

Les essais accélérés exigent un niveau avancé d'expertise pour le choix des facteurs d'accélération. Ces facteurs sont très différents en fonction des mécanismes de défaillance sollicités et dépendent de la structure du spécimen lui-même (par exemple les phénomènes de cliquetis, des non-linéarités), les matériaux (effets de notching, les soudures, les traitements thermiques), le chargement lui-même ou d'autres conditions de l'environnement. Lorsque des facteurs d'accélération élevés sont appliqués, d'autres modes de défaillances, irréalistes, ou d'autres points d'accumulation de contraintes sans rapport avec la réalité, peuvent apparaître sur le spécimen (CEI 60068-1), ou au contraire des modes de défaillances importants peuvent disparaître. Ainsi, les phénomènes d'usure par contact associés à des jeux entre les éléments peuvent disparaître sous des niveaux élevés et irréalistes.

Exemple de facteur d'accélération pour l'acier doux:

Pour les modes de défaillance en fatigue mécanique vibratoire de l'acier doux, des facteurs d'accélération limités à 2 sont recommandés. Il est recommandé que les niveaux d'essai accéléré a_{essai} n'excèdent pas 2 fois les niveaux de vie réelle $a_{\text{réelle}}$. Pour un essai sinus, cela signifie que l'amplitude $a_{\text{crête}}$ de l'essai devrait être inférieure à deux fois l'amplitude maximale $a_{\text{crête réelle}}$. Il convient que la valeur efficace de la densité spectrale d'excitation associée à un essai aléatoire accéléré a_{efficace} soit limitée à deux fois la valeur efficace réelle $a_{\text{efficace réelle}}$.

Sinus: $a_{\text{crête}} \leq 2 \times a_{\text{crête, réelle}}$

Aléatoire: $a_{\text{efficace}} \leq 2 \times a_{\text{efficace, réelle}}$

NOTE Pour l'acier doux et la défaillance de fatigue, un facteur d'accélération de 2 réduit la durée d'essai par facteur compris entre 8 et 32.

Un facteur d'accélération plus élevé peut être approprié sous réserve d'une connaissance détaillée du spécimen, des modes de défaillances, des points d'accumulation de contraintes, des niveaux de contrainte en ces points, des matériaux et de leur courbe caractéristique en fatigue (courbe de Wöhler des nombres de cycles à rupture). L'utilisation des courbes du nombre de cycles à rupture pour le matériau considéré peut permettre de retenir le facteur d'accélération par le choix d'un nombre réduit de cycles en regard du nombre réel et d'en déduire l'augmentation correspondante du niveau de contrainte. Pour les essais accélérés en fatigue, il est recommandé d'utiliser des excitations de type sinus à des fréquences fixes ou aux fréquences de résonance.

5 Environnement vibratoire du spécimen

5.1 Généralités

Les essais en environnement sont utilisés pour simuler en laboratoire les effets des vibrations rencontrées dans l'environnement réel pendant la vie du matériel. Dans ce qui suit, une méthode est proposée pour estimer ces niveaux vibratoires.

5.2 Collecter l'information, préparer la décision

Définir un profil de vie du spécimen comme défini dans la CEI 60721-4.

4.3 Accelerated testing

It may be necessary, for example, to limit test time, to raise the test severity above the actual dynamic conditions. By increasing the vibration levels, the mechanical stresses in the specimen increase and the lifetime for fatigue damage decreases. In general, accelerated testing is possible with all the test methods described above.

Accelerated testing demands a high degree of engineering judgement in the choice of acceleration factors. They are very different for diverse failure modes and depend on the structure of the specimen itself (for example rattle due to slackness, non-linearities), the materials (notch effects, welds, heat treatment), loading and other environmental conditions. When high acceleration factors are used, other unrealistic failure modes or locations of damage can occur on the specimen (IEC 60068-1) or important failure modes may be removed. For example, fretting due to looseness between parts may be removed/inhibited by unrealistic high test levels.

Example of an acceleration factor for mild steel:

For fatigue failure modes of mild steel, acceleration factors not greater than 2 are recommended. The test acceleration levels a_{test} should be increased by not more than a factor of 2 above the real life levels $a_{\text{real life}}$. For a sine test, this means that the test amplitude a_{peak} should be less than twice the real life amplitude $a_{\text{peak, real life}}$. The r.m.s. value of the test excitation a_{rms} during an accelerated random test should be limited to twice the real life r.m.s. value $a_{\text{rms, real life}}$.

Sine: $a_{\text{peak}} \leq 2 \times a_{\text{peak, real life}}$

Random: $a_{\text{rms}} \leq 2 \times a_{\text{rms, real life}}$

NOTE For mild steel and fatigue failure, an acceleration factor of 2 reduces the test time by a factor of between 8 and 32.

A higher acceleration factor may be appropriate if there is detailed knowledge about the specimen, the failure mode, the location of damage, the stresses at this location, the material and its fatigue characteristics (S/N-curve). Looking at the appropriate stress-cycles-to-failure curves of the material considered, the acceleration factor can be chosen by considering a reduced number of cycles-to-failure with respect to the actual one, and the corresponding increased stress level. For accelerated fatigue testing, it is recommended to use sine excitation at fixed or resonance frequencies.

5 Vibration environment of a specimen

5.1 General

Environmental testing is used to simulate in a laboratory the effects of a real life vibration environment. In the following, a proposal to estimate this vibration environment is given.

5.2 Collecting information, preparing a decision

Define a life cycle of the specimen as defined in IEC 60721-4.

Décrire les conditions dynamiques associées à chacune des situations du profil de vie.

Identifier et décrire les niveaux vibratoires rencontrés par le matériel:

- estimer les influences d'origines externes;
- estimer les influences des conditions internes (les vibrations générées par les machines et leur résonances particulières affectent le spécimen, les jeux et le bruit (cliquetis)),
- estimer l'influence des parties tournantes.

5.3 Définition des conditions dynamiques

Grâce aux informations collectées en 5.2, l'une des conditions dynamiques données dans le Tableau 1 peut être retenue. Si aucune de ces classes n'est appropriée, le type de condition d'environnement doit être estimé (voir l'Article 6).

6 Estimation des conditions dynamiques réelles rencontrées par le matériel au long de sa vie

6.1 Généralités

Dans le cas où l'environnement réel ne correspondrait à aucune des classes décrites en 5.3 et dans le Tableau 1, le type d'environnement vibratoire doit être déterminé de manière différente. Il existe différentes méthodes d'obtention d'informations quant à ces conditions dynamiques:

- par la mesure des vibrations réellement rencontrées pendant la vie du spécimen;
- par l'utilisation de l'expérience et des avis d'expert;
- par l'exploitation des normes appropriées, telle la série de normes CEI 60721-3.

Il est nécessaire de décider quelle spécification représente au mieux les conditions de la vie réelle du matériel, ainsi, pour le transport par aéronef à voilure tournante, la spécification à exploiter peut être de type bruit sur bruit et non nécessairement de type sinus sur bruit.

- l'extrapolation à partir d'un projet antérieur/similaire.

Ce paragraphe ne traite que de la manière de définir le type d'environnement vibratoire (à dominante sinus, ou stochastique, ou les deux) et non des sévérités associées; en effet, le but premier de la présente norme est de choisir parmi les essais de vibration. La méthode recommandée consiste à réaliser des mesures de l'environnement réel sur la vie du matériel puis, à partir de l'analyse de ces mesures, à définir le type d'environnement. Cela suppose que la mesure de ces environnements est réalisable ou que ces mesures sont déjà disponibles.

NOTE Puisque la méthode recommandée est la plus coûteuse, il serait financièrement justifié d'exploiter ces données mesurées pour la définition des sévérités d'essais.

6.2 Mesure des conditions dynamiques

Une courte description des principales activités nécessaires à la mesure et à l'analyse des données vibratoires dans le cadre de la présente norme est proposée ci-dessous.

NOTE Pour plus de détails, se référer à l'IES-RP-DET 012.1 et à la DIN 30787.

6.2.1 Planification

Une planification attentive est de la plus haute importance afin d'acquérir la certitude que les meilleures données possibles seront obtenues. Cela comprend les étapes suivantes:

Describe the dynamic conditions in each state of the life cycle.

Identify and describe the vibrations encountered in use:

- estimate external influences;
- estimate internal influences (machine vibrations and resonances excite the specimen, clearances and rattle);
- estimate rotary influences.

5.3 Definition of dynamic conditions

With the information collected in 5.2, one of the dynamic conditions given in Table 1 may be chosen. If none of those classes are appropriate, the type of environmental condition has to be estimated (see Clause 6.)

6 Estimation of 'real life' dynamic conditions for the specimen

6.1 General

If the actual environment does not fit into the classes stated in 5.3 and Table 1, the type of vibration environment has to be determined in some other way. There are different methods in order to obtain information about the dynamic conditions:

- measuring real life vibration;
- using experience and an engineering judgement;
- using an appropriate standard, such as the IEC 60721-3 series.

It is necessary to decide which specification best represents real life conditions, for example, for rotary wing aircraft transport of a package, the specification to use may be RoR and not necessarily SoR.

- extrapolation from a previous/similar project.

This subclause deals only with how to define the type of vibration environment (dominated by sine, stochastic or both vibration types) and not the severities, as the prime objective of this standard is to select from among vibration tests. The recommended method is to perform measurements of the real life vibration and, from analysis of the measured data, to define the type of environment. This presumes that it is practicable to perform such measurements or that measurement data is already available.

NOTE As the recommended method is the most expensive one, it would be cost-effective to use the measurement data to define the severities.

6.2 Measurement of dynamic conditions

A short description of the main activities needed in order to measure and analyse vibration data for the purpose of this standard is given below.

NOTE For more details, refer to IES-RP-DET 012.1 and DIN 30787.

6.2.1 Planning

Careful planning is most important in order to be sure to obtain the best possible data. This includes the following steps:

- Choix de l'emplacement des capteurs (et de leur direction), il est recommandé que ces emplacements soient aussi près que possible du ou des points de fixation du spécimen.
- Choix du type et du nombre de capteurs (ISO 5348).
- Choix du système d'acquisition.
- Choix du convertisseur analogique numérique de la plage de mesure dynamique et de la plage de fréquences.
- Définition des conditions de mise en œuvre de l'équipement de mesures et de la durée de mesures.
- Prise en compte et estimation de la précision de mesures et des sources possibles d'erreurs.

6.2.2 Etalonnage

Avant toute mesure, il est nécessaire de réaliser un étalonnage de la chaîne de mesures, et de vérifier l'absence d'erreurs telles que des bruits excessifs de mesures liés à l'instrumentation, de bruits par intermittence, d'influences des lignes d'alimentation électriques; de surcroît tout l'équipement de mesures doit être étalonné.

6.2.3 Acquisition des données

Il est recommandé que les données représentatives de la vie réelle du matériel soient acquises dans des conditions représentatives du matériel en service, ceci comprenant tous les paramètres, y compris climatiques, pouvant avoir une influence sur l'information acquise ou pouvant expliquer des résultats anormaux.

6.2.4 Ré-étalonnage

Après avoir réalisé les opérations de 6.2.3, il convient qu'un nouvel étalonnage, ou au moins une vérification de bon fonctionnement, soit réalisé afin d'établir si l'appareillage de mesures est resté opérationnel et cela à l'intérieur des résultats d'étalonnage.

6.3 Analyse des données

6.3.1 Généralités

Les analyses spectrales des densités de probabilité et les fonctions d'autocorrélation sont des outils utiles à la détermination du caractère prédominant d'un signal de mesures de l'environnement associé à la vie réelle du matériel, à savoir, dans ce cas, aléatoire ou déterministe ou une combinaison des deux.

NOTE On suppose que les signaux dynamiques mesurés sont stationnaires; dans le cas contraire, il y a lieu de porter une attention particulière lors de la phase d'analyse afin d'identifier et de séparer les signaux de sorte que les techniques appropriées à chaque type soient utilisées.

Avant de réaliser une analyse détaillée, il est préconisé de réaliser une inspection visuelle du signal, dans le domaine temporel comme dans le domaine fréquentiel. Cette opération peut aider à l'identification d'erreurs telles que

- les chutes de signal,
- les dérives du signal,
- les pertes de signal,
- le bruit de mesures excessif (lié à une plage dynamique trop importante),
- les points aberrants,
- les dysfonctionnements analogiques numériques.

- Selection of measurement location(s) (and direction(s)), which should be as close as possible to the fixing point(s) of the specimen.
- Selection of type and number of sensors (ISO 5348).
- Selection of data acquisition system.
- Selection of analog-to-digital converter dynamic range and frequency range.
- Definition of operating conditions of the measurement equipment and measurement duration.
- Consideration and estimation of data inaccuracy and possible error sources.

6.2.2 Calibration

Before any measurement is carried out, it is necessary to perform a calibration of the measuring chain; it is also necessary to check for errors such as excessive instrumentation noise, intermittent noise or power-line pick-up. In addition, all the measurement equipment shall be in calibration.

6.2.3 Data acquisition

Real life data should be acquired under the appropriate in-service conditions, including any climatic or other such parameters, as these may have some effect on the information acquired and may assist in explaining anomalous results.

6.2.4 Re-calibration

After completion of 6.2.3, a new calibration, or at least a system check, should be performed to establish that the measurement equipment has remained operational and within calibration.

6.3 Data analysis

6.3.1 General

Spectral analyses, probability density and autocorrelation are useful tools to determine the dominating character of a signal in a measurement of the real life environment, which in this case may be either random or deterministic in character, or a combination of both.

NOTE It is assumed that the measured dynamic signals are stationary; otherwise special should be taken during the analysis to identify and separate the signals so that the correct techniques can be applied.

Before performing a detailed analysis, it is recommended that a visual inspection of the signal, both in the time and frequency domain, be carried out. This may help to identify errors that can occur such as

- signal clipping,
- spurious trends,
- signal dropouts,
- excessive digital noise (as a result of choosing too wide a dynamic range),
- wild points,
- analog-to-digital-converter malfunctions.

Pendant l'inspection visuelle des données dans le domaine fréquentiel, des crêtes marquées peuvent apparaître en corrélation avec des sources physiques d'excitation. De tels crêtes peuvent être causées par une source périodique telle qu'une machine tournante ou peuvent représenter une résonance faiblement amortie de la structure, ce qui, dans ce cas, témoigne d'un signal aléatoire à bande étroite plutôt que d'un signal périodique. Comme mentionné plus haut, il existe trois procédures de base permettant de distinguer ces deux types de signaux. La première procédure est une méthode déductive basée sur l'analyse spectrale, la seconde procédure exploite l'analyse des densités de probabilités et la troisième fait appel à la fonction d'autocorrélation.

6.3.2 Analyse spectrale

Les signaux périodiques et aléatoires se comportent différemment en fonction de la bande de fréquence d'analyse. Puisque les crêtes spectrales d'un signal périodique n'ont en théorie aucune amplitude fréquentielle, la largeur de la crête ne variera pas avec la bande fréquentielle d'analyse. Cela signifie que la largeur de la crête répondra aux changements sur la résolution fréquentielle.

L'allure d'une composante aléatoire à bande étroite est indépendante de la bande spectrale d'analyse, pourvu que la largeur de la bande d'analyse soit plus étroite que la composante à bande étroite.

Il existe deux types de spectres utiles à l'analyse spectrale des bandes étroites: le spectre linéaire et la DSA. Lorsque le spectre linéaire est utilisé, l'amplitude de crête d'une composante aléatoire à bande étroite dans le domaine spectral diminue avec la largeur de la bande d'analyse, alors que l'amplitude d'une composante périodique reste constante. Si le calcul porte sur la DSA, alors l'amplitude de la composante périodique augmente avec l'augmentation de la bande d'analyse ou avec la diminution de la résolution fréquentielle alors que l'amplitude de la composante aléatoire reste sensiblement constante.

6.3.3 Analyse de la densité de probabilité

La densité de probabilité décrit la probabilité $p(x)$ pour qu'une valeur instantanée du signal prenne la valeur x . Pour les signaux aléatoires en général, il est communément admis de faire l'hypothèse d'une distribution normale (de Gauss).

Si le signal à traiter est quasi périodique, par exemple dans un signal aléatoire à large bande si la fréquence de la composante périodique varie, comme c'est le cas de machines tournantes à vitesse de rotation variable, ou de signaux périodiques dont l'amplitude varie aléatoirement, alors l'analyse de la densité de probabilité sur une bande fréquentielle limitée est très utile (IES-RP-DET 012.1).

Si la crête dans le domaine spectral trouve son origine dans un signal aléatoire à bande étroite, alors la fonction densité de probabilité du signal en sortie d'un filtre passe-bande est très proche d'une loi gaussienne.

La fonction densité de probabilité d'un signal sinusoïdal à fréquence unique est illustrée à la Figure 1. Si le signal est composé d'une sinusoïde et de signaux aléatoires, l'allure sera telle qu'illustrée à la Figure 2.

During the visual inspection of spectral data, there can be sharply defined peaks that could be correlated with a physical source. Such peaks might be due to a periodic source such as rotating machinery, or could represent a lightly damped resonance of a structure, that is, the spectral peak represents a narrowband random signal rather than a periodicity. As mentioned above, there are three basic procedures that can be used to distinguish between these two types of signal. The first is a straightforward procedure using spectral analysis, the second is a procedure involving probability density analysis and the third concerns autocorrelation.

6.3.2 Spectral analysis

Periodic and random signals will behave differently depending on the analysis bandwidth. As the spectral peak of a periodic signal theoretically has no bandwidth, the width of the peak will be the same as the analysis bandwidth. This means that the width of a peak will follow a change in the frequency resolution.

The character of a narrowband random component is independent of the analysis bandwidth, provided that the analysis bandwidth is much smaller than the bandwidth of the narrowband component.

There are two types of spectrum useful for narrowband spectral analysis: linear spectrum and ASD. When using linear spectrum, the spectral peak magnitude of a narrowband random component will decrease, whereas a peak of a periodic component will not, when the analysis bandwidth decreases. On the other hand, if an ASD is computed, the periodic component will increase and the random component will stay roughly the same when reducing the frequency resolution or increasing the bandwidth.

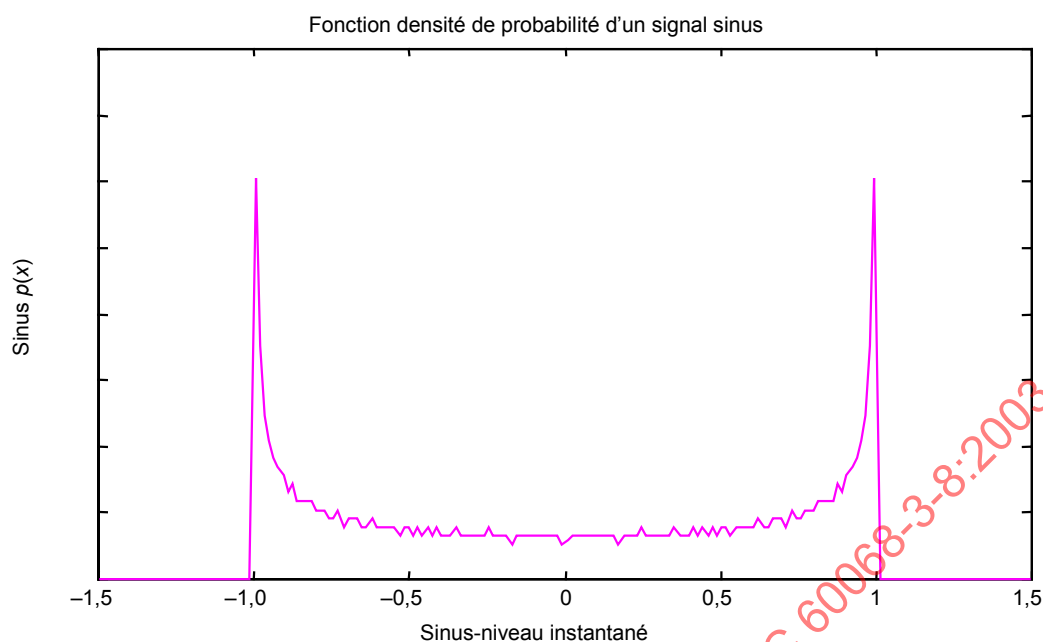
6.3.3 Probability density analysis

The probability density describes the probability $p(x)$ for the instantaneous value of a signal having a certain value of x . For random signals in general, it is commonly assumed that they are normally distributed (or Gaussian).

When dealing with quasi-periodic signals, for example, if the frequency of the periodic component in a broadband random signal is not fixed, for example, rotation machinery with varying rotational speed, or when the amplitude of a periodic signal is randomly modulated, band-limited probability density analysis is very useful (IES-RP-DET 012.1).

If the spectral peak originates from a narrowband random signal, the probability density function of the band-pass filtered signal will be very close to the Gaussian form.

The probability density function of a single frequency sinusoidal signal is shown in Figure 1. If the signal is a mixture of sine and random signals, the shape will be as in Figure 2.



NOTE La courbe est perturbée en raison du bruit sur le système de traitement du signal.

Figure 1 – Densité de probabilité d'un signal sinusoïdal à fréquence unique

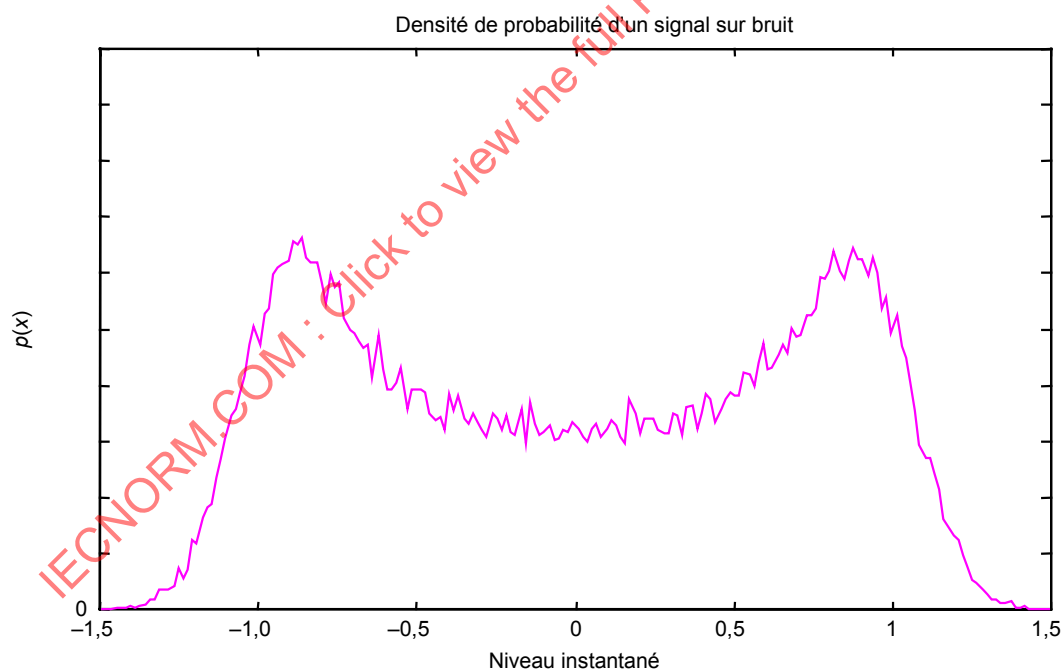
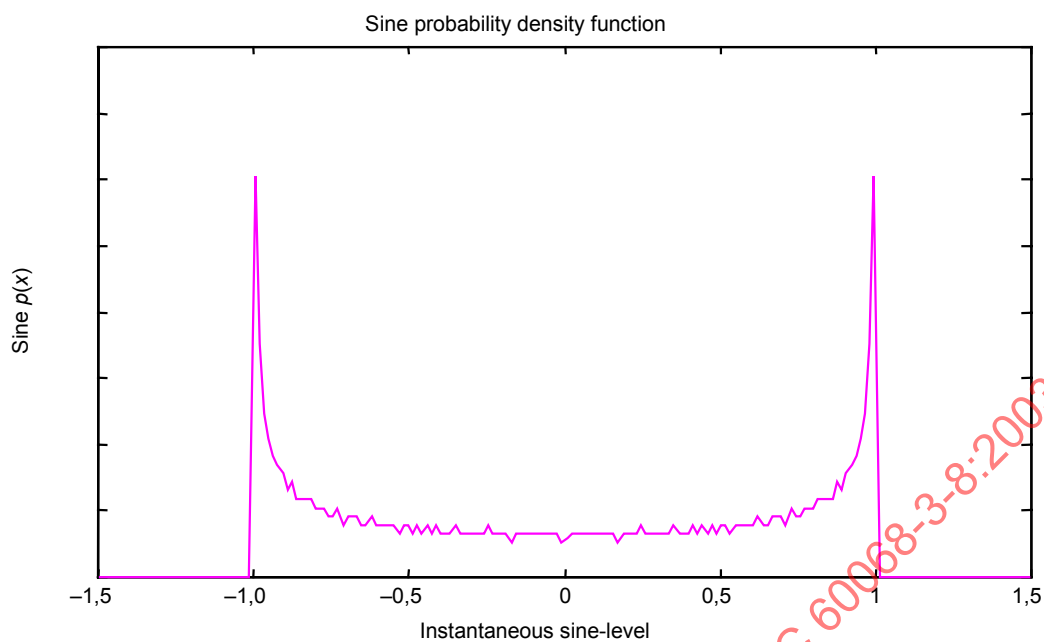


Figure 2 – Densité de probabilité d'un signal composé sinus et aléatoire

L'allure de la fonction densité de probabilité fournit des renseignements importants quant au type de composantes contenues dans le signal et à leur rapport en amplitude. Cela justifie la méthode d'essai appropriée fournie à l'Article 7.



NOTE The curve is disturbed due to noise in the signal processing equipment.

Figure 1 – Probability density of a single frequency sinusoidal signal

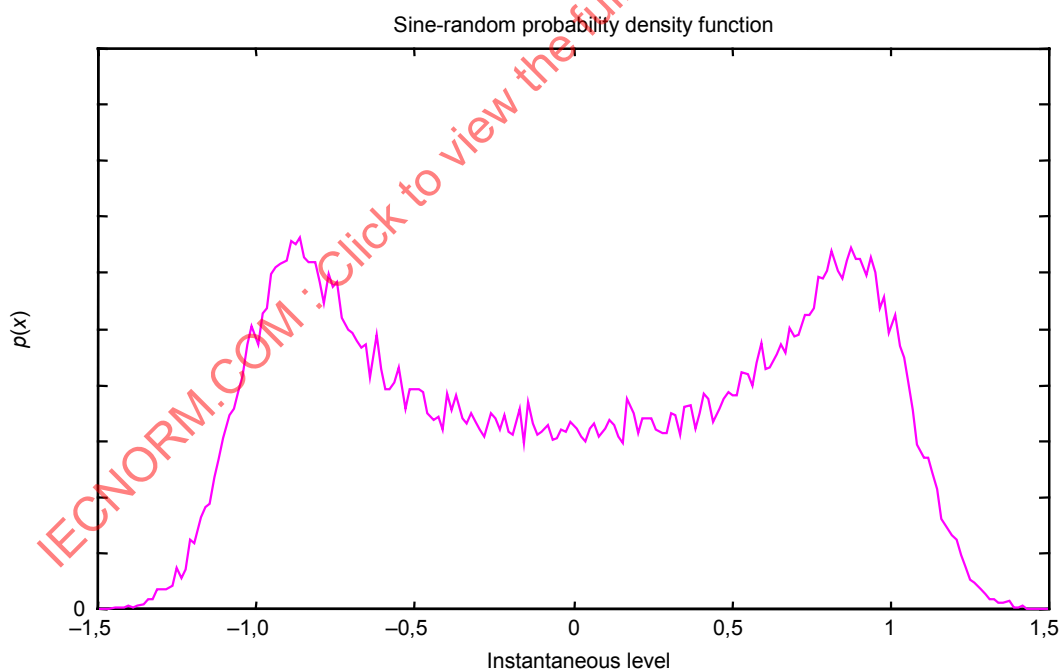


Figure 2 – Probability density of a mixture of sine and random signals

The shape of the probability density function gives important information about the type and the ratio of the levels of the different components in a signal. This leads to the appropriate test method as described in Clause 7.

6.3.4 Autocorrélation

La fonction d'autocorrélation est l'inverse de la transformée de Fourier de l'autospectre du signal (soit ici, la DSA) et peut être utile à la distinction entre les signaux sinusoïdaux et aléatoires.

Pour un signal sinusoïdal dans le domaine temporel, la fonction d'autocorrélation est toujours une fonction sinusoïdale tel qu'illustrée sur la Figure 3a.

La fonction d'autocorrélation de signaux aléatoires en sortie d'un filtre passe-bas (idéal) de fréquence de coupure $B/2$ est une fonction de la forme $\sin x/x$ qui prend la valeur zéro pour les multiples de $1/B$ (voir Figure 3b). Lorsque le signal aléatoire est filtré par un filtre passe-bande de fréquence centrale f_0 (aléatoire à bande étroite), la fonction d'autocorrélation est donnée par le produit des fonctions d'autocorrélation des Figures 3a et 3b. Cette fonction résultat a donc une amplitude modulée en cosinus dont l'enveloppe est donnée par une fonction $\sin x/x$, comme illustré à la Figure 3c.

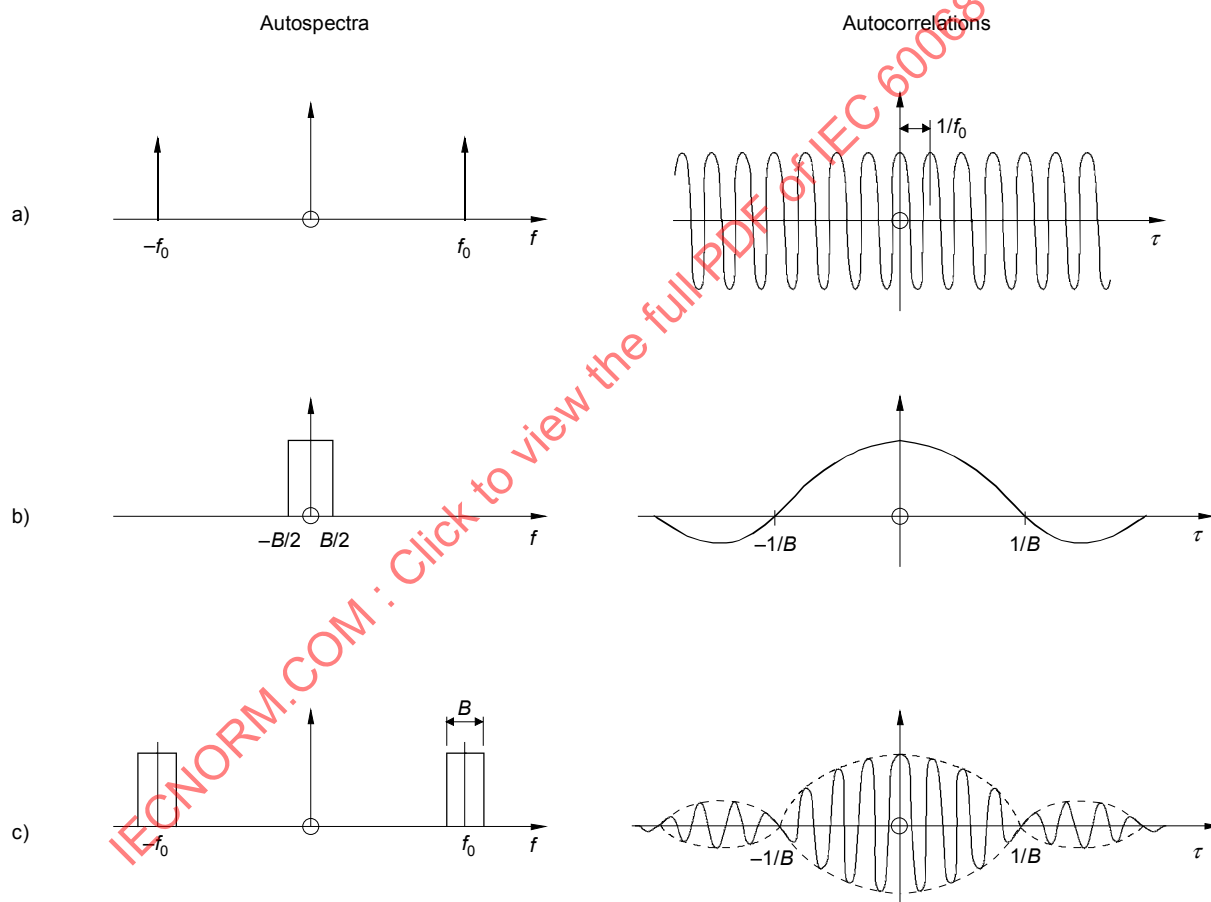


Figure 3a – Sinusoïde, de fréquence f_0

Figure 3b – Aléatoire à bande limitée par une fréquence de coupure à $B/2$,

Figure 3c – Aléatoire à bande étroite, de largeur de bande B , aux fréquences centrées sur f_0

Figure 3 – Fonction d'autocorrélation de différents signaux³

³ D'après *Randall et al.*, voir la bibliographie.

6.3.4 Autocorrelation

The autocorrelation function is the inverse Fourier transform of an autospectrum (here ASD) and can also be useful when detecting whenever there is a sinusoidal or a random signal.

For a sinusoidal time signal the autocorrelation function always gives an sinusoidal answer, as shown in Figure 3a.

The autocorrelation function for band limited random, with (ideal) low-pass filter cut-off frequency $B/2$, is a $\sin x/x$ function with zeroes at multiples of $1/B$ (see Figure 3b). When the random signal is band pass filtered with the centre frequency f_0 (narrow band random) the autocorrelation function is given by the product of the autocorrelation functions in Figures 3a and 3b. Consequently it is an amplitude modulated cosine, with the envelope given by a $\sin x/x$ function, as shown in Figure 3c.

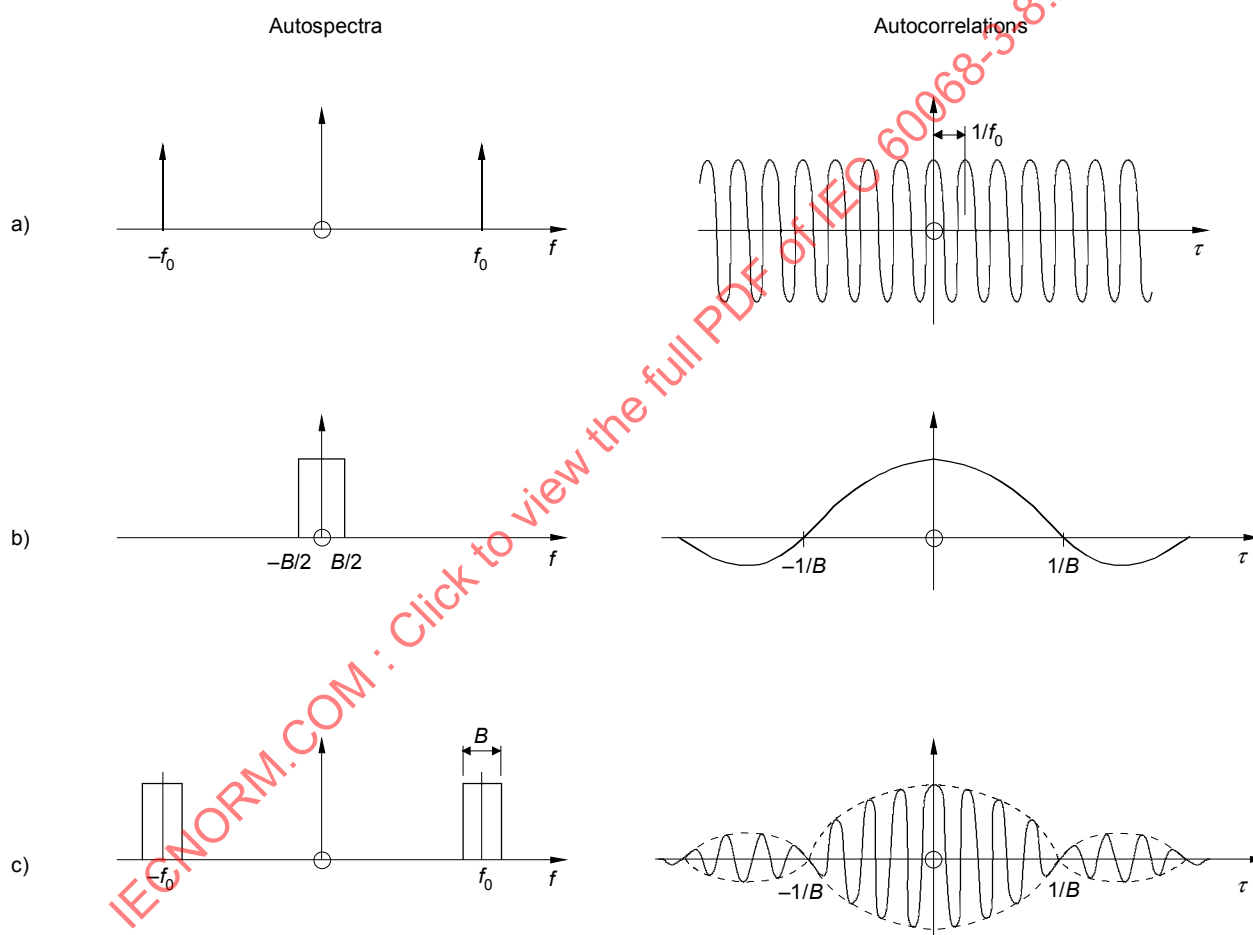


Figure 3a – Sinusoid, frequency f_0

Figure 3b – Band limited random, cut-off frequency $B/2$,

Figure 3c – Narrow band random, bandwidth B , centred on frequency f_0

Figure 3 – Autocorrelation functions for various signals³

³ From Randall *et al.*, see bibliography.

7 Choix d'une méthode d'essai

7.1 Généralités

Afin de décider de la méthode d'essai appropriée, les renseignements suivants sont nécessaires:

- une description de l'environnement vibratoire (voir l'Article 5);
- une définition du type d'environnement (voir 5.3);
- une estimation des conditions dynamiques (voir l'Article 6).

Après avoir évalué ces renseignements, il doit être défini si le spécimen sera installé dans, ou fixé sur, la structure vibratoire ou non (cas du transport). La sélection parmi les différentes méthodes d'essai peut alors être effectuée (voir Tableau 1).

Si les conditions dynamiques vécues par le spécimen sont évaluées en accord avec l'Article 6, se référer à la dernière ligne du Tableau 1.

NOTE Pour plus de détails quant au traitement des données et à leur déclinaison en niveaux d'essais, se référer à la DIN 30787-5.

Tableau 1 – Exemples d'environnements vibratoires et de méthodes d'essai recommandées

Méthode d'essai recommandée CEI 60068		Mode combiné Partie 2-80	Aléatoire Partie 2-64	Sinus Partie 2-6
Type de signal vibratoire pour l'essai		Sinus+ bruit	Aléatoire	Sinusoïdal
Environnement vibratoire du spécimen	Stockage		X	
	Utilisation de matériel portable		X	
	Transport		X	
Spécimens installés dans:	Bâtiments/utilisation à poste fixe		X	
	Bâtiments, sur ou proche de machines tournantes et de leurs accessoires			X
	Véhicules ferroviaires ou routiers		X	
	Spécimens fixés sur les moteurs ou placés à proximité	X		
	Avions à réaction	X	X	
	Hélicoptères ou avions à hélices	X		
	Systèmes spatiaux, simulation de charges quasi statiques ^a			X
	Composants spatiaux		X	
	Navires à hélices	X		
Conditions dynamiques estimées, type de signal	Sinus + bruit	X		
	Aléatoire		X	
	Sinus			X

NOTE Pour la description des classes de conditions dynamiques, voir la CEI 60721-3-0.

^a Les accélérations linéaires (lancement de véhicules spatiaux) seront simulées à l'aide d'une excitation sinusoïdale dont la fréquence sera bien inférieure à la première fréquence naturelle du spécimen, et qui sera appliquée pendant quelques cycles seulement.

7 Selection of test method

7.1 General

For making a decision on the appropriate test method, the following information is needed:

- description of vibration environment (see Clause 5);
- definition of environment type (see 5.3);
- estimation of dynamic conditions (see Clause 6).

After making an assessment of this information, it has to be defined if the specimen will be installed in, or fixed to, a vibrating structure or not (for example transportation). A selection from among the following test methods can then be made (see Table 1).

If the dynamic conditions of the specimen have been estimated according to Clause 6, refer to the last rows of Table 1.

NOTE For details about data processing and derivation of test specifications, refer to DIN 30787-5.

Table 1 – Examples of vibration environment and recommended test method

Recommended test method IEC 60068		Mixed mode Part 2-80	Random Part 2-64	Sine Part 2-6
Type of vibration signal for testing		Random+ sinusoidal	Random	Sinusoidal
Vibration environment of the specimen	Storage		X	
	Portable use		X	
	Transportation		X	
Specimens installed in	Buildings/stationary use		X	
	Buildings, on or close to rotary machines and parts			X
	Rail and road vehicles		X	
	Specimens fixed on or close to engines	X		
	Jet aircrafts	X	X	
	Helicopter, propeller aircrafts	X		
	Spacecraft systems, simulation of quasi-static-loads ^a			X
	Spacecraft components		X	
	Ship, propeller driven	X		
	Ship, propulsion driven		X	
Estimated dynamic conditions, type of signal	Random + sinusoidal	X		
	Random		X	
	Sinusoidal			X
NOTE For the descriptions of classes for dynamic conditions, see IEC 60721-3-0.				
^a Linear acceleration (space craft launch) will be simulated by a sinusoidal excitation at a frequency well below the first natural frequency of the specimen for only a few cycles.				

7.2 Essai sinus

La méthode d'essai par excitation sinus est la plus ancienne des méthodes d'excitation pour les essais dynamiques. Cette méthode est décrite dans la CEI 60068-2-6.

7.2.1 Avantages

Les essais sinus peuvent être réalisés à l'aide de moyens d'essais et d'équipements simples, peu coûteux, et à l'utilité éprouvée lors des essais vibratoires en phase de conception ou de développement.

Ces essais sont simples à interpréter et la réponse vibratoire peut être visualisée très lisiblement. C'est pourquoi ce type d'essai est utilisé pour la recherche et l'étude des fréquences critiques des systèmes, souvent à l'aide de lampes stroboscopiques.

Les essais sinus peuvent être utilisés lors des essais de fatigue à amplitude constante et à durée réduite (essais accélérés, voir 4.3). Il est possible d'accroître la puissance de l'essai, même avec des générateurs de vibrations à la puissance limitée, en exploitant les fréquences de résonances du spécimen.

7.2.2 Inconvénients

Des réponses irréalistes en amplitude peuvent apparaître lors d'essais sinus en raison des phénomènes de résonance, ces effets pouvant solliciter des modes de défaillances irréalistes ou provoquer des défaillances en des localisations non représentatives.

L'expérience a parfois montré une faible corrélation entre les résultats d'essais sinus (défaillances lors d'essais) et la vie du matériel en service (défaillances en service). C'est pourquoi l'interprétation des résultats d'essais sinus nécessite une bonne expérience et l'application d'une démarche d'évaluation.

7.3 Essais aléatoires

Les essais de type aléatoire sont communément utilisés et sont décrits en détails dans la CEI 60068-2-64.

7.3.1 Avantages

La plupart des environnements de transports sont de nature aléatoire.

Si les informations disponibles quant à l'environnement vibratoire ne montrent aucune composante sinus, alors l'essai de type aléatoire est une alternative appropriée à l'essai en mode combiné.

De nombreuses fréquences de résonances sont sollicitées simultanément, mais la réponse pour chacune est moins importante que lors d'un essai sinus; c'est pourquoi il convient qu'aucun phénomène irréaliste de dommage en fatigue n'apparaisse.

NOTE Voir ASTM D4728.

7.3.2 Inconvénients

Pour conduire ce type d'essais, des moyens plus coûteux, plus sophistiqués et du personnel d'une plus grande compétence sont nécessaires.

7.2 Sine testing

The sine test method is the oldest excitation method for dynamic testing. It is described in IEC 60068-2-6.

7.2.1 Advantages

Sine tests can be performed using simple, less expensive test facilities and equipment and are of particular use for diagnostic purposes during design/development vibration testing.

The tests are easy to understand and the vibration response can be visualized more readily. Therefore, sine is used for system response investigations, often using stroboscope illumination at visible amplitudes.

Sine tests can be used to perform constant amplitude fatigue test in a short time (accelerated tests, see 4.3). Using the resonance frequencies of the specimen, it is possible to increase test forces with limited shaker forces.

7.2.2 Disadvantages

Unrealistic response amplitudes due to resonance effects can occur during sine testing and the resultant test failure mode and location can be unrealistic.

Experience has shown that sometimes there is poor correlation between sine-test results (test failures) and in-service lifetime of the specimen (in service failures). Therefore, the evaluation of sine-test results needs much more experience and an assessment process to be carried out.

7.3 Random testing

The random test method is commonly used and precisely described in IEC 60068-2-64.

7.3.1 Advantages

Most transportation environments are random in nature.

If the available information for the vibration environment does not show any sinusoidal content, random testing is an appropriate alternative to mixed mode testing.

Many resonances are excited simultaneously, but the resonance responses are less intense than during sine tests; therefore, no unrealistic fatigue damage due to resonance response should occur.

NOTE See ASTM D4728.

7.3.2 Disadvantages

More expensive, sophisticated test equipment and staff of greater experience are required to conduct the tests.

7.4 Essais de type combiné

La plupart des systèmes numériques de contrôle modernes exploite des logiciels de contrôle des modes combinés. Une nouvelle norme d'essais de type combiné est en cours de préparation (CEI 60068-2-80).

7.4.1 Avantages

Cette méthode d'essais autorise la combinaison des différents types d'excitation vibratoires, chacun pouvant être pondéré. Elle comprend les essais aléatoires et les essais sinus:

- sinus sur bruit (SsB);
- bruit sur bruit (BsB);
- sinus sur bruit sur bruit (SsBsB).

Les méthodes d'essais combinés représentent l'état de l'art en matière d'essai de vibrations, et se traduisent dans les laboratoires par des réponses plus proches des conditions réelles du matériel en service. En conséquence, les mécanismes de défaillance et les localisations de ces défaillances sont plus proches de la réalité au cours de ces essais qu'au cours des autres types d'essais.

7.4.2 Inconvénients

Les mesures initiales ainsi que l'application de la méthode d'essais réclament une description précise du contenu sinusoïdal et aléatoire du signal d'excitation. Le niveau de complexité associé aux mesures et à l'analyse des données est plus élevé que lors d'essais sinus pur ou aléatoire seul.

Les essais de type combiné nécessitent des puissances instantanées maximales plus importantes et en conséquence des moyens d'essais plus puissants, à sévérité similaire, que les moyens destinés aux essais aléatoires ou sinus.

8 Etude et recherche des fréquences critiques du spécimen

8.1 Généralités

Lorsque cela est prescrit par la spécification particulière, la recherche et l'étude des fréquences critiques du spécimen devront être réalisées avant et après les essais d'endurance, de manière à observer si la réponse dynamique du spécimen évolue en liaison avec une quelconque dégradation mécanique, par exemple l'usure ou la fatigue.

Lorsque cela est précisé dans l'essai de la CEI 60068-2-64, l'étroitesse de la bande de résonance du spécimen devra être mesurée avant la réalisation des essais d'endurance par la conduite d'investigations sur la réponse vibratoire du spécimen, de manière à déterminer la résolution en fréquence pour le système de pilotage.

Des informations utiles quant au spécimen seront obtenues par l'évaluation des caractéristiques vibratoires du spécimen dans son ensemble ou de certaines de ses parties, par exemple les réponses en différents points de la structure.

Lorsque des difficultés liées au moyen d'essai en vibration lui-même apparaissent, la mesure des caractéristiques en réponse du système de vibration sans le spécimen fournit des informations utiles à la résolution de ces difficultés.

7.4 Mixed mode testing

Most modern digital vibration control systems facilitate mixed mode control software. Currently a new standard for mixed mode testing (IEC 60068-2-80) is being prepared.

7.4.1 Advantages

This test method allows the combination of different kinds of vibration excitation environments with different weighting. It includes random and sine testing:

- sine-on-random (SoR);
- random-on-random (RoR);
- sine-on-random-on-random (SoRoR).

Mixed mode testing methods represent the current state of the art, resulting in laboratory testing producing a vibration response closer to the in-service conditions. Therefore, the damage mechanism and location of failure are closer to reality than those of other test methods.

7.4.2 Disadvantages

Both the initial measurement and the test method need a precise description of the random and sinusoidal content of the vibration signal. The complexity required for measurement and data analysis is much higher than for random or sine testing.

Mixed mode testing needs higher peak excitation forces and, therefore, more powerful test equipment compared to sine or random testing at similar severities.

8 Vibration response investigation of the specimen

8.1 General

If prescribed in the relevant specification, the vibration response of a specimen will need to be measured before and after endurance testing in order to see if the specimen shows changes in dynamic response due to some form of mechanical degradation, for example, fatigue or wear.

If prescribed in the random vibration test of IEC 60068-2-64, the sharpness of the specimen resonance will need to be measured before endurance testing by carrying out vibration response investigations, in order to determine the frequency resolution for the control process.

Useful information about the specimen will be obtained by measuring the vibration characteristics of the whole specimen or parts of it, for example, responses from different measuring points of the structure.

If problems occur with the vibration test system itself, the measurement of the response characteristics of the system with the specimen removed will provide useful information to solve these problems.

La présente norme aide à la sélection de la méthode de sollicitation appropriée pour une investigation des réponses vibratoires. Cela peut être réalisé à l'aide d'une excitation sinusoïdale ou aléatoire, à sélectionner indépendamment de la méthode d'essai choisie; ainsi l'investigation pourrait être conduite à l'aide d'une excitation sinusoïdale alors que l'environnement vécu par le matériel est de nature aléatoire ou vice versa. Le Tableau 2 donne les méthodes à retenir préférentiellement pour l'étude et la recherche des fréquences critiques.

8.2 Objectifs

Il est indispensable de réaliser l'étude et la recherche des fréquences critiques lorsque cela est prescrit par la spécification particulière. Les objectifs de cette étude et recherche des fréquences critiques sont les suivants:

- a) déterminer les fréquences critiques et/ou le facteur d'amortissement de manière à choisir les conditions des essais d'endurance;
- b) détecter les variations des fréquences critiques avant et après l'essai de manière à estimer les dommages ou défauts liés à la fatigue mécanique qui pourrait s'être produits pendant l'essai d'endurance, voir 8.6;
- c) étudier le comportement à l'aide d'un stroboscope de manière à étudier les caractéristiques dynamiques sous sollicitation sinusoïdale;
- d) mesurer la fonction de transfert ou la transmissibilité entre différents points du spécimen de manière à étudier son comportement dynamique;
- e) mesurer le facteur d'amortissement associé aux fréquences de résonances afin d'étudier le comportement dynamique du spécimen;
- f) mesurer les non-linéarités en réponse du spécimen afin d'évaluer les jeux, le bruit (cliquetis), les boulons desserrés, les points de durcissement ou de ramollissement;
- g) mesurer la distorsion (tolérance sur le signal) dans les conditions de l'essai, avec le spécimen pour la qualité de l'essai, ou sans le spécimen pour la qualité du moyen d'essais;
- h) mesurer les non-linéarités liées au moyen d'essais afin d'identifier les atténuations ou les amplifications (performance).

Il convient que la méthode d'excitation soit prescrite dans la spécification particulière. Lorsque les variations des fréquences critiques doivent être identifiées avant et après l'essai d'endurance, la même méthode d'excitation, la même procédure, les mêmes niveaux, les mêmes interfaces mécaniques et les mêmes points de fixation doivent être utilisés avant et après l'essai.

8.3 Excitation sinusoïdale

Une excitation sinusoïdale est recommandée

- a) pour observer la forme de l'accélérogramme des différents signaux à l'aide d'un oscilloscope de manière à détecter facilement les erreurs sur le signal,
- b) pour observer le comportement du spécimen à l'aide d'un stroboscope,
- c) lorsque des non-linéarités sont attendues en réponse du spécimen,
- d) pour détecter les fréquences critiques qui génèrent des phénomènes de cliquetis ou le martèlement à l'intérieur du spécimen.

Il est important de noter que les excitations sinusoïdales peuvent générer des temps de maintien en résonance excessifs et des sur-contraintes au niveau du spécimen.