

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
61502**

Première édition
First edition
1999-11

**Centrales nucléaires de puissance –
Réacteurs à eau pressurisée –
Surveillance vibratoire des structures internes**

**Nuclear power plants –
Pressurized water reactors –
Vibration monitoring of internal structures**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61502:1999

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60 000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60 000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
61502**

Première édition
First edition
1999-11

**Centrales nucléaires de puissance –
Réacteurs à eau pressurisée –
Surveillance vibratoire des structures internes**

**Nuclear power plants –
Pressurized water reactors –
Vibration monitoring of internal structures**

© IEC 1999 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 photocopie 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
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	8
Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Définitions	10
3 Principes de la surveillance des structures internes	14
4 Prescriptions relatives au système.....	16
4.1 Utilisation du bruit neutronique	16
4.1.1 Instrumentation nucléaire	16
4.1.2 Prélèvement et conditionnement du signal	16
4.2 Utilisation de signaux relatifs aux vibrations de la cuve	18
4.2.1 Instrumentation	18
4.2.2 Conditionnement du signal	20
4.3 Utilisation de signaux d'un système multi-capteurs	22
4.3.1 Considérations générales	22
4.3.2 Système multi-capteurs type.....	22
4.3.3 Caractéristiques de l'instrumentation	24
4.3.4 Conditionnement du signal	26
4.4 Système de surveillance.....	26
4.4.1 Equipement de surveillance.....	26
4.4.2 Logiciel de surveillance	28
4.4.3 Mode d'acquisition spectrale.....	28
4.4.4 Etat du réacteur	30
5 Procédures de surveillance	30
5.1 Etudes préliminaires pour la mise en service du système de surveillance du réacteur... 30	
5.1.1 Etudes théoriques, pouvant être confirmées par des essais sur maquette .. 30	
5.1.2 Qualification pendant les essais à chaud	30
5.1.3 Identification des mouvements au moment du démarrage	30
5.2 Phase de surveillance	32
5.2.1 Premier démarrage du réacteur (30 % de puissance).....	32
5.2.2 Pendant la campagne combustible	32
5.3 Phase de diagnostic	34
6 Documentation	34
6.1 Mise en service initiale	34
6.2 Surveillance	36
6.3 Diagnostics	36

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope	11
2 Definitions	11
3 Principles of internal structure monitoring	15
4 System requirements	17
4.1 Use of neutron noise	17
4.1.1 Nuclear instrumentation	17
4.1.2 Sampling and conditioning of the signal	17
4.2 Use of vessel vibration signals	19
4.2.1 Instrumentation	19
4.2.2 Signal conditioning	21
4.3 Use of the signals of a multi-sensor system	23
4.3.1 In general	23
4.3.2 Typical multi-sensor system	23
4.3.3 Instrumentation characteristics	25
4.3.4 Signal conditioning	27
4.4 Monitoring system	27
4.4.1 Monitoring equipment	27
4.4.2 Monitoring software	29
4.4.3 Spectral acquisition mode	29
4.4.4 Reactor conditions	31
5 Monitoring procedures	31
5.1 Studies preliminary to setting up the reactor monitoring system	31
5.1.1 Theoretical studies, which may be confirmed by mock-up tests	31
5.1.2 Qualification during hot tests	31
5.1.3 Identification of movement at the time of start-up	31
5.2 Monitoring phase	33
5.2.1 First start-up of the reactor (30 % power)	33
5.2.2 During the fuel cycle	33
5.3 Diagnosis phase	35
6 Documentation	35
6.1 Initial entry into service	35
6.2 Monitoring	37
6.3 Diagnosis	37

	Pages
Annexe A (informative) Définition mathématique des fonctions spectrales	70
Annexe B (informative) Principe de mesure des chambres neutroniques hors cœur	74
B.1 Principe de la transmission des vibrations des internes aux chambres neutroniques hors cœur	74
B.2 Mesure du déplacement des structures internes par les chambres neutroniques hors cœur	74
Annexe C (informative) Principe et critères pour la détection et la surveillance d'internes avec des capteurs de déplacement absolus extérieurs à la cuve (exemple type)	78
Annexe D (informative) Bibliographie	82
Figure 1 – Schéma des internes et de l'instrumentation	38
Figure 2 – Implantation des chambres neutroniques hors cœur	40
Figure 3 – Déformées modales types sur les modes poutres d'assemblages et du panier	42
Figure 4 – Déformées modales types sur les modes coques d'un écran thermique cylindrique ...	44
Figure 5 – Exemple d'évolution des signatures vibratoires du panier de cœur lors d'une dégradation de l'anneau de calage (résultats obtenus sur maquette)	46
Figure 6 – Exemple d'évolution des signatures du bruit neutronique hors cœur consécutive à une très légère relaxation d'anneau de calage (résultats obtenus sur réacteur)	48
Figure 7 – Principe de détection du balancement du panier de cœur par le bruit neutronique hors cœur	50
Figure 8 – Exemple de détection de modes vibratoires d'internes sur les signatures de bruit neutronique hors cœur	52
Figure 9 – Exemple de détection du balancement des internes par un capteur de vibration extérieur à la cuve	54
Figure 10 – Surveillance du support de cœur supérieur par les vibrations verticales absolues de la cuve (cohérence A1/A3)	56
Figure 11 – Surveillance de la vibration horizontale de la jupe de répartition de débit (1 ^{er} mode poutre) par les vibrations verticales absolues de la cuve (cohérence A2/A4)	58
Figure 12 – Localisation des détecteurs neutroniques hors cœur sur les réacteurs de type VVER	60
Figure 13 – Exemple de prélèvement du bruit neutronique	62
Figure 14 – Système multi-capteurs type pour la surveillance vibratoire d'un REP à quatre boucles (voir [2])	64
Figure 15 – Exemple de traitement d'une DSPN par le système de surveillance	66
Figure 16 – Exemple de traitement des fonctions de cohérence-phase par le système de surveillance	68
Figure C.1 – Comparaison de résonances d'internes par mesure directe/indirecte	80

Annex A (informative) Mathematical definition of the spectral functions	71
Annex B (informative) Principle of measurement by ex-core neutron detectors	75
B.1 Principle of transmission of vibrations of internals to ex-core detectors	75
B.2 Measurement by ex-core detectors of displacement of internal structures	75
Annex C (informative) Principle criteria for detection and monitoring internals by absolute displacement sensors outside the vessel (typical example)	79
Annex D (informative) Bibliography	83
Figure 1 – Diagram of internals and instrumentation	39
Figure 2 – Arrangement of ex-core neutron detectors	41
Figure 3 – Typical modal shapes on beam modes of fuel assemblies and core barrel	43
Figure 4 – Typical modal shapes on the shell modes of a cylindrical thermal shield	45
Figure 5 – Example of change in core barrel vibratory signatures in the case of degradation of the hold-down spring (results obtained on a mock-up)	47
Figure 6 – Example of change in ex-core neutron noise signatures following a very slight relaxation of the hold-down spring (results obtained on a reactor)	49
Figure 7 – Principle of detection of core barrel pendular motion using ex-core neutron noise	51
Figure 8 – Example of detection of internals vibratory modes on ex-core neutron noise signatures	53
Figure 9 – Example of detection of swinging of internals using a vibration sensor outside the vessel	55
Figure 10 – Monitoring of the upper core support by vertical absolute vessel vibrations (coherence A1/A3)	57
Figure 11 – Monitoring of the horizontal flow skirt vibration (1st beam mode) by vertical absolute vessel vibrations (coherence A2/A4)	59
Figure 12 – Location of ex-core neutron detectors on VVER-type reactors	61
Figure 13 – Example of sampling of neutron noise	63
Figure 14 – Typical multi-sensor system for vibration monitoring in a four-loop PWR (see [2])	65
Figure 15 – Example of processing of a NPSD by the monitoring system	67
Figure 16 – Example of processing of coherence-phase functions by the monitoring system	69
Figure C.1 – Comparison of directly/indirectly measured internal resonances	81

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE – SURVEILLANCE VIBRATOIRE DES STRUCTURES INTERNES

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 61502 a été établie par le sous-comité 45A: Instrumentation des réacteurs, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45A/360/FDIS	45A/366/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 3.

Les annexes A, B, C et D sont données uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que cette publication reste valable jusqu'en 2004.

A cette date, selon décision préalable du comité, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**NUCLEAR POWER PLANTS –
PRESSURIZED WATER REACTORS –
VIBRATION MONITORING OF INTERNAL STRUCTURES**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61502 has been prepared by subcommittee 45A: Reactor instrumentation, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

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

FDIS	Report on voting
45A/360/FDIS	45A/366/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 3.

Annexes A, B, C and D are for information only.

The committee has decided that this publication remains valid until 2004.

At this date, in accordance with the committee's decision, the publication will be

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

INTRODUCTION

Plusieurs incidents ont affecté les structures internes des tranches de réacteurs à eau pressurisée (REP) (panier de coeur, écran thermique), et ont occasionné de coûteuses réparations. De plus, avec le vieillissement des réacteurs, de tels incidents deviendront de plus en plus probables. Dans le but d'améliorer la maintenance sur ce type de composants, il est souhaitable de détecter tous les comportements anormaux suffisamment tôt.

L'utilisation de méthodes non intrusives a montré que la détection de problèmes vibratoires ayant un impact sur ces structures est faisable lorsque le réacteur est en fonctionnement.

Il est possible de concevoir un système qui permette aux spécialistes d'effectuer une surveillance et une interprétation régulière et fiable et ainsi d'espérer réduire la fréquence des inspections. La standardisation d'une telle surveillance et de l'interprétation peut faciliter les comparaisons au niveau international.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61502:1999

INTRODUCTION

Several incidents have affected the internal structures of pressurized water reactor (PWR) units (core barrel, thermal shield), and have resulted in costly repairs. Furthermore, with the ageing of the reactors, such incidents will become more and more probable. In order to improve maintenance on such components, it is desirable to detect all abnormal behaviour at a sufficiently early stage.

The use of non-intrusive methods has shown that detection of vibratory problems having an impact on these structures is feasible during reactor operation.

It is possible to design a system which can enable regular, reliable monitoring and interpretation by specialists and therefore is expected to reduce the frequency of inspections. Standardization of such monitoring and interpretation can facilitate comparisons on an international level.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61502:1999

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE – SURVEILLANCE VIBRATOIRE DES STRUCTURES INTERNES

1 Domaine d'application

La présente norme s'applique aux systèmes utilisés pour surveiller le comportement vibratoire des structures internes des réacteurs à eau pressurisée (panier de coeur, écran thermique, supports de coeur supérieurs et inférieurs, etc.) et les assemblages combustibles, sur la base des fluctuations neutroniques observées à l'extérieur de la cuve et des vibrations de la cuve. L'objectif principal de la surveillance décrite dans la présente norme est de détecter des dégradations des structures internes. Des mesures sur le circuit primaire peuvent être associées à la surveillance des internes pour apporter des informations supplémentaires et permettre la détection de dégradations des supportages du circuit primaire. La présente norme couvre les caractéristiques du système et donne des recommandations pour la surveillance.

2 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent.

2.1

panier de coeur

structure cylindrique située dans la cuve et supportant le coeur (voir figure 1)

2.2

système de blocage du panier de coeur

anneau de calage (voir figure 1) ou toute autre structure (par exemple des ressorts) comprimée entre les internes supérieurs et inférieurs

2.3

écran thermique

structure métallique montée autour du panier de coeur, attachée à ce dernier au moyen de fixations, destinée à limiter la fragilisation sous irradiation de l'acier de la cuve (voir figure 1). Tous les réacteurs ne sont pas équipés de ce type de structure

2.4

chambre neutronique hors coeur

capteur d'ionisation situé à l'extérieur de la cuve (au niveau du coeur), mesurant le flux neutronique dans le but de surveiller la puissance du réacteur (voir figures 1 et 2)

2.5

bruit neutronique

fluctuations du flux neutronique dues à des variations d'émission de la source de neutrons, ou à des variations dans le transport des neutrons vers l'extérieur de la cuve. Le bruit neutronique hors coeur correspond aux fluctuations du signal émis par une chambre neutronique hors coeur et est proportionnel au signal de fluctuations du flux atteignant la chambre

NUCLEAR POWER PLANTS – PRESSURIZED WATER REACTORS – VIBRATION MONITORING OF INTERNAL STRUCTURES

1 Scope

This standard applies to systems used for monitoring the vibratory behaviour of the internal structures of pressurized water reactors (core barrel, thermal shield, upper and lower core support, etc.) and fuel assemblies on the basis of neutron fluctuations observed outside the vessel and vessel vibrations. The main objective of monitoring described in this standard is to detect degradation of internal structures. Primary circuit measurements can be considered together with internal monitoring to provide further information and make it possible to detect degradation of primary circuit structural supports. This standard covers the system characteristics and gives recommendations for monitoring.

2 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply

2.1

core barrel

cylindrical structure situated in the vessel and supporting the core (see figure 1)

2.2

core barrel clamping system

hold-down spring (see figure 1) or any other structure (e.g. springs) compressed between upper and lower internals

2.3

thermal shield

metallic structure mounted around the core barrel, attached to it by clamps, intended to limit embrittlement of the pressure vessel steel under radiation (see figure 1). Not all reactors are fitted with this type of structure

2.4

ex-core neutron detector

ionization sensor situated outside the vessel (on a level with the core), measuring the neutron flux in order to monitor reactor power (see figures 1 and 2)

2.5

neutron noise

fluctuations in the neutron flux caused by variations in emission at the neutron source, or by variations in the transport of neutrons towards the outside of the vessel. Ex-core neutron noise corresponds to the fluctuations in the signal emitted by an ex-core neutron detector and is proportional to the signal of fluctuations in the flux reaching the detector

2.6

fréquence propre

fréquence vibratoire préférentielle d'une structure donnée. Pour une structure à masse répartie, il y a un nombre infini de fréquences propres distinctes, chacune étant associée à un *mode propre*. Pour un mode donné, plus la fréquence propre est faible, plus l'amplitude vibratoire (*amplitude modale*) est élevée. Ceci explique le fait que seuls les premiers modes vibratoires de la structure peuvent être détectés, c'est-à-dire les modes ayant les fréquences les plus faibles (pour les structures internes, essentiellement les modes 1 et 2)

2.7

mode vibratoire poutre

mode vibratoire propre d'une structure se comportant comme une poutre selon un axe d'observation donné (voir figure 3). Le premier mode poutre du panier de coeur correspond à un mouvement pendulaire

2.8

mode vibratoire coque

mode vibratoire propre d'une structure axisymétrique. Un exemple de ce type de structure est l'écran thermique cylindrique (voir figure 4)

2.9

spectre énergétique des neutrons

distribution de la population de neutrons émis dans un flux, selon leur énergie

2.10

usure du combustible

énergie par unité de masse libérée par le combustible depuis son chargement dans le coeur

2.11

signature spectrale

fonction dépendant de la fréquence (voir annexe A). Par exemple:

2.11.1

signature monovoie (pour un signal seul)

l'autospectre, exprimé en densité spectrale de puissance (DSP), l'autospectre normalisé, exprimé en valeur relative de la fluctuation neutronique ou densité spectrale de puissance normalisée (DSPN);

2.11.2

signatures croisées (pour des signaux associés deux à deux)

les fonctions interspectre, exprimées en densité spectrale de puissance interspectre (DSPI), phase et cohérence

2.12

pic

la portion d'une signature spectrale se trouvant entre deux minimums, culminant à un maximum. La fréquence du maximum est la *fréquence du pic*. Sous certaines conditions (en particulier, l'apparition de pics à la même fréquence sur d'autres signatures, et respectant certaines règles sur la cohérence et la phase), il peut correspondre à un mode propre d'une structure

2.6

eigenfrequency

preferred vibratory frequency of a given structure. For a structure with a distributed mass, there are an infinite number of distinct eigenfrequencies, each of which is associated with a *natural mode*. The lower the eigenfrequency, the higher the vibration magnitude (amplitude in frequency domain) of a given mode (*modal magnitude*). This explains the fact that only the first few vibratory modes of the structures can be detected, which is to say those at the lowest frequencies (essentially modes 1 and 2 on internal structures)

2.7

beam mode vibration

natural vibratory mode of a structure behaving like a beam with respect to a given axis of observation (see figure 3). The first beam mode of the core barrel corresponds to pendular motion

2.8

shell mode vibration

natural vibratory mode of a structure having an axis of symmetry. One example of this type of structure is a cylindrical thermal shield (see figure 4)

2.9

neutron energy spectrum

distribution of the population of neutrons emitted in a flux, dependent on their energy

2.10

fuel burnup

energy liberated per mass unit by the fuel since being loaded in the core

2.11

spectral signature

function depending on frequency (see annex A). As an example:

2.11.1

mono-channel signature (for a single signal)

autospectrum, expressed as power spectral density (PSD), normalized autospectrum, expressed as a relative value of neutron fluctuation or normalized power spectral density (NPSD);

2.11.2

cross-signatures (for signals associated two by two)

cross-spectrum, expressed as cross power spectral density (CPSD), phase and coherence functions

2.12

peak

portion of a spectral signature culminating in a maximum between two minima. The frequency of the maximum is the *peak frequency*. Under certain conditions (in particular, the appearance of peaks at the same frequency on other signatures, and respecting certain laws of coherence and phase), it may correspond to a natural mode for the structure

3 Principes de la surveillance des structures internes

La surveillance vibratoire des structures internes est basée sur l'identification, la caractérisation et le suivi dans le temps des pics correspondant aux modes vibratoires des structures. En application des principes de la mécanique vibratoire, des dégradations de structures se traduisent par des modifications de fréquence, amplitude et forme des pics (voir figures 5 et 6). Du fait de la grande taille des structures surveillées, les modes vibratoires essentiels au processus de surveillance sont situés en basses fréquences (par exemple, en fonction du type de réacteur, au dessous de 50 Hz ou 100 Hz). De plus, l'expérience montre que la plupart des phénomènes (et la plupart des dégradations) sont à évolution lente dans le temps (cinétique d'évolution de l'ordre du mois). La détection d'anomalies prend effet quand, pour chaque pic, des seuils d'alerte sur la fréquence ou l'amplitude du pic sont définis et dépassés.

Ces pics apparaissent sur les signatures spectrales du bruit neutronique délivré par les chambres neutroniques hors cœur existantes (pour plus d'informations sur le principe de mesure par les chambres neutroniques hors cœur, voir annexe B et figures 7 et 8) ou des vibrations mécaniques délivrées par des capteurs extérieurs à la cuve. En effet, les structures internes induisent une vibration forcée de la cuve par l'intermédiaire de la lame d'eau entre le cœur, le panier et la cuve et par l'intermédiaire des fixations des internes à la cuve. Des accéléromètres ou des capteurs de déplacement montés sur la cuve détectent donc les vibrations de la cuve elle-même et des internes (voir annexe C et figures 9, 10 et 11).

Le choix de la technique à appliquer pour la surveillance des structures internes (c'est-à-dire en particulier le type et nombre de capteurs) peut dépendre de la situation particulière. Les paramètres qui influencent la décision sont par exemple:

- le type de réacteur et/ou des problèmes spécifiques aux internes;
- les connaissances disponibles pour l'interprétation des vibrations des structures en conditions normales ou à la suite d'un défaut;
- le niveau visé de précocité de détection et de fiabilité des diagnostics.

Pour réaliser la surveillance vibratoire des structures internes de réacteur, une des techniques suivantes au moins doit être utilisée: bruit neutronique (voir 4.1) ou vibrations de la cuve (voir 4.2). Jusqu'à un certain degré, les capteurs de vibration de la cuve sont redondants et complémentaires du bruit neutronique qui utilise les chambres neutroniques préexistantes. Comme les capteurs de vibration de la cuve sont basés sur un principe de mesure différent de celui des chambres neutroniques, ils peuvent en particulier aider à distinguer les vibrations des phénomènes de réactivité. Pour améliorer la fiabilité des diagnostics, il convient d'utiliser les deux techniques.

Des mesures de vibration du circuit primaire et de pression du fluide de refroidissement peuvent être associées à la surveillance du bruit neutronique et des vibrations de la cuve pour apporter d'autres informations (comme la séparation des sources d'excitation provenant de l'intérieur ou de l'extérieur de la cuve, pour les changements de signatures) et rendre possible la détection de dégradations des supportages du circuit primaire (voir 4.3).

L'efficacité du système de surveillance dépend des capteurs, de la connaissance de l'état de référence, des tests de démarrage et d'analyses sur modèle et maquette.

3 Principles of internal structure monitoring

Vibration monitoring of internal structures is based on the identification, characterization and monitoring over time of the peaks corresponding to the vibratory modes of the structures. In line with the principles of vibration mechanics, degradation in the structures shows as changes in frequency, magnitude and shape of the peaks (see figures 5 and 6). Because of the large size of the monitored structures, vibratory modes essential to the monitoring process are in the low frequency range (for instance, depending on the reactor type, below 50 Hz or 100 Hz). Furthermore, experience shows that most of the phenomena (and most kinds of degradation) evolve slowly over time (kinetics of change approximately on a one-month scale). Detection of anomalies becomes operative when, for each peak, warning thresholds for the peak frequency or magnitude are defined and exceeded.

These peaks appear on the spectral signatures of neutron noise delivered by the existing ex-core neutron detectors (for further information on the principle of measurement by ex-core neutron detectors, see annex B and figures 7 and 8) or of mechanical vibrations delivered by sensors outside the vessel. The internal structures induce a forced vibration of the vessel via the water layer between the core barrel and the vessel and via the clamping between the internals and the vessel. Accelerometers or displacement sensors mounted on the vessel therefore detect vibration of the vessel itself and of the internals (see annex C and figures 9, 10 and 11).

The decision on the monitoring technique to be applied for vibration monitoring of internal structures (i.e. in particular on the type and number of sensors) may depend on the particular conditions. Factors which influence the decision are for example:

- type of reactor and/or specific problems with internals;
- availability of knowledge for the interpretation of normal and fault-influenced structure vibrations;
- intended degree of early detection and of reliability of diagnoses.

In order to perform vibration monitoring of the reactor internal structures, at least one of the following techniques shall be used: neutron noise (see 4.1) or vessel vibrations (see 4.2). To a certain degree, vessel vibration sensors are complementary and redundant to neutron noise which uses the existing neutron detectors. Because vessel vibration sensors are based on a measurement principle different from that of the neutron detectors, they can particularly help in distinguishing vibrations from reactivity phenomena. To improve the reliability of the diagnoses, both techniques should be used.

Primary circuit vibration measurements and coolant pressure measurements may be considered together with neutron noise and vessel vibration monitoring to provide further information (such as separation of driving forces for signature changes originating inside or outside the reactor vessel) and make it possible to detect degradation of primary circuit structural supports (see 4.3).

The effectiveness of the monitoring system depends on the sensors, knowledge of reference state, start-up tests and model and mock-up analyses.

4 Prescriptions relatives au système

4.1 Utilisation du bruit neutronique

4.1.1 Instrumentation nucléaire

Les chambres neutroniques à ionisation font partie intégrante du système de mesure de la centrale. La disposition la plus commune consiste en quatre chambres, montées autour du cœur à 90° et divisées verticalement en deux sections, au minimum (voir figure 2). Il convient d'utiliser au minimum quatre signaux des chambres neutroniques pour le système de surveillance. Il convient de prendre les sections les plus sensibles et les plus précises.

Pour les réacteurs de type VVER, seuls, les signaux de trois chambres neutroniques peuvent être utilisés. En pratique, les trois détecteurs de flux neutronique sont localisés dans des chambres d'ionisation disposées autour du réacteur à environ 120° (voir figure 12). Une telle instrumentation peut être utilisée pour le système de surveillance, mais nécessite des analyses spécifiques.

4.1.2 Prélèvement et conditionnement du signal

La sortie du signal de l'instrumentation nucléaire (voir un exemple type de chaîne de mesure à la figure 13) doit être isolée de façon à s'assurer qu'un court-circuit aux connexions des signaux n'affecte pas la conduite de la centrale.

4.1.2.1 Signal total

Le signal total de chaque section de chambre neutronique utilisée est nécessaire car l'amplitude vibratoire d'une structure est proportionnelle à la partie fluctuante du signal divisée par le signal total (voir l'article B.2).

Le signal en courant i de la chambre neutronique est converti en tension par un convertisseur et amplifié (amplificateur d'isolement). Cependant, la partie fluctuante de ce signal n'est pas électriquement transmise au-dessus de 1 Hz à 2 Hz. La tension totale ainsi obtenue («signal total») est de l'ordre de quelques centaines de millivolts à quelques volts. En général, elle est directement accessible au travers de l'armoire de mesure.

4.1.2.2 Signal fluctuant (bruit neutronique)

La composante dynamique du courant total di est très faible comparée à i (dans les 10^{-4}). Elle ne peut pas être utilisée telle quelle, et doit être transformée en un signal dont la dynamique peut être exploitée dans la bande de fréquence utile.

Il convient d'obtenir le signal fluctuant à partir du signal total par filtrage ou par soustraction de la composante continue. En cas de filtrage, un filtre passe-haut avec une fréquence de coupure inférieure à la plus basse fréquence de structures intéressante (typiquement entre 0,3 Hz et 1 Hz) doit être utilisé, et la partie filtrée doit être amplifiée (d'un coefficient généralement compris entre 500 et 1 000). Il convient de régler le filtre de telle façon que l'erreur relative sur la phase entre deux filtres soit inférieure à 2°.

4.1.2.3 Signal normalisé (bruit neutronique normalisé)

Il est proportionnel à di/i , et il convient de l'obtenir en divisant le signal fluctuant par le signal total:

- soit en utilisant un diviseur (précision indicative $\pm 1\%$);
- soit en indiquant, au moment la conversion en unité physique, la valeur du signal total relevée dans l'armoire.

4 System requirements

4.1 Use of neutron noise

4.1.1 Nuclear instrumentation

Ionization neutron detectors are an integral part of the nuclear measurement system. The most common arrangement is four of them, mounted at 90° angles around the core and divided vertically into at least two sections (see figure 2). A minimum of four neutron detector signals should be used for the monitoring system. They should be taken from the most sensitive and accurate sections.

For VVER-type reactors, only the signals from three neutron detectors can be used. In practice, the three neutron flux detectors are located in ionization chamber channels at angles of about 120° around the reactor (see figure 12). Such instrumentation may be used for the monitoring system, but needs special analyses.

4.1.2 Sampling and conditioning of the signal

The signal output of nuclear instrumentation (see a typical measurement line in figure 13) shall be isolated to ensure that a short circuit in signal connections does not affect plant operation.

4.1.2.1 Total signal

The total signal from each used neutron detector is needed since the displacement of a structure is proportional to the fluctuating component of the signal divided by the total signal (see clause B.2).

The current signal i from the neutron detectors is converted to voltage by a converter and amplified (isolation amplifier). However, the fluctuating component in this signal is not electronically transmitted above 1 Hz to 2 Hz. The total voltage thus obtained ("total signal") is on the order of from a few hundred millivolts to a few volts. It is generally accessible directly via the instrumentation cabinet.

4.1.2.2 Fluctuating signal (neutron noise)

The dynamic component di in the total current is very low in comparison with i (a few times 10^{-4}). It cannot be used as such, and has to be converted into a signal having dynamic characteristics that can be exploited in the useful frequency range.

The fluctuating signal should be obtained from the total signal by filtering or off-setting the DC component. In the case of filtering, a high-pass filter having a cut-off frequency lower than the lowest structure frequency of interest (typically, between 0,3 Hz and 1 Hz) shall be used, and the filtered part shall be amplified (by a factor generally between 500 and 1 000). The filters should be tuned so as to get a relative phase error lower than 2° between each filter.

4.1.2.3 Normalized signal (normalized neutron noise)

This is proportional to di/i , and should be obtained by dividing the fluctuating signal by the total signal:

- either using a divider (indicative accuracy ± 1 %);
- or by indicating, at the time of conversion into physical units, the value of the total signal recorded in the instrumentation cabinet.

Pour des réacteur de type VVER, d'autres méthodes de mesures permettant d'obtenir le rapport d/i dans la gamme 10^{-4} – 10^{-3} avec une erreur inférieure à 10 % peuvent être utilisées, par exemple le codage informatique de la valeur du courant avec un logiciel adéquat.

NOTE – L'analyse de fluctuations de signaux issus de détecteurs neutroniques en coeur (mobiles ou fixes) peut faciliter le diagnostic lorsqu'on étudie un phénomène localisé. Etant donné que les signaux provenant de détecteurs amovibles ne sont pas disponibles de façon continue dans un système de surveillance (ils ne sont disponibles que quand les détecteurs sont placés dans le coeur), le diagnostic au moyen d'une analyse du bruit neutronique en coeur n'est pas couvert par la présente norme.

4.2 Utilisation de signaux relatifs aux vibrations de la cuve

4.2.1 Instrumentation

Il convient que l'instrumentation de la cuve permette des mesures de déplacement de la cuve. Il convient qu'elle puisse supporter les conditions d'environnement du réacteur et qu'elle ait des caractéristiques en accord avec la durée de fonctionnement attendue, telles que:

- la température;
- l'irradiation;
- une réponse plate dans la bande de fréquence utilisée (typiquement une erreur maximale sur l'amplitude de ± 1 dB).

Il convient que les capteurs soient du type capteurs de déplacement (capteurs absolus ou relatifs) ou du type accéléromètre piézo-électrique (également utilisés pour la détection des corps errants, voir [1]¹⁾.

4.2.1.1 Emplacement des capteurs

Il convient de monter les capteurs:

- soit sur la cuve, de façon à prendre la mesure dans la direction verticale (sur la bride du couvercle de cuve, par exemple);
- soit aussi près que possible de la cuve, sous la cuve (sur les pénétrations des tubes guides d'instrumentation, par exemple).

S'il sont montés sur la cuve et mesurent dans la direction verticale, ils sont alors tout particulièrement sensibles aux vibrations horizontales et verticales de la cuve et des internes. Ainsi, d'un côté, ils sont redondants et complémentaires des chambres neutroniques. D'un autre côté, ils permettent la surveillance de composants vibrant non pas dans la direction horizontale mais verticale, vibrations qui ne peuvent pas être détectées par des capteurs de flux neutronique. Il convient de monter au minimum deux capteurs de vibrations (voir figures 13 et 14).

S'ils sont montés sous la cuve, sur les pénétrations des tubes guides d'instrumentation, alors il convient qu'ils aient des directions de mesure permettant de faire des corrélations avec les chambres neutroniques, et donc qu'ils couvrent les deux axes de montage des chambres neutroniques. Il convient de monter au minimum deux capteurs de vibrations (à 90° l'un de l'autre).

Il convient de s'assurer qu'on puisse facilement les enlever, qu'ils ne gênent pas l'accès à des équipements d'essais non destructifs, et que le débit de dose ambiant soit aussi faible que possible.

¹⁾ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie, en annexe D.

For VVER-type reactors, other measurement methods enabling the determination of the ratio dI/I within the range 10^{-4} – 10^{-3} with an error of not more than 10 % may be used, for instance, conversion of the value of the current into code and appropriate computer processing.

NOTE – Analysis of fluctuations in signals from in-core neutron detectors (movable or fixed) can be of help in diagnosis when studying localized phenomena. As the signals from the movable detectors are not continuously available in a monitoring system (they are only available when the detectors are placed in the core), diagnosis by means of analysis of in-core neutron noise is not covered by this standard.

4.2 Use of vessel vibration signals

4.2.1 Instrumentation

The vessel instrumentation should permit measurement of vessel displacement. It should withstand the reactor environmental conditions and have characteristics in line with the expected service life such as:

- temperature;
- radiation;
- flat response in the frequency range used (typical maximum error in magnitude: ± 1 dB).

The types of sensors should be displacement sensors (absolute or relative sensors) or piezo-electric accelerometers (also used for loose parts detection, see [1]¹).

4.2.1.1 Location of sensors

Sensors should be mounted:

- either on the vessel, measuring in the vertical direction (at the flange of the vessel closure head for instance);
- or as close as possible to the vessel, beneath the vessel (for instance on a vessel penetration tube for instrumentation).

If they are mounted on the vessel measuring in the vertical direction, then they are especially sensitive to the horizontal and vertical vibrations of the vessel and its internals. Thus, on one hand they are complementary and redundant to the neutron detectors. On the other hand they allow monitoring of components which vibrate not in the horizontal but in the vertical direction and such vibrations cannot be detected by neutron flux sensors. At least two vibration sensors should be mounted (see figures 13 and 14).

If they are mounted beneath the vessel, on vessel penetration tubes for instrumentation, then they should have directions of measurement that permit correlation with neutron detectors, and should therefore cover the two perpendicular mounting axes of the neutron detectors. At least two vibration sensors should be mounted (at 90° to each other).

It should be ensured that they are easily removable, that they do not hamper access to non-destructive testing equipment, and that the ambient dose rate is as low as possible.

¹) Figures in square brackets refer to the Bibliography in annex D.

4.2.1.2 Fixation des capteurs

Tous les types de moyens de fixation des capteurs (vis, brides, colle) peuvent être utilisés, à condition:

- qu'ils n'affectent pas l'intégrité de la cuve;
- qu'ils permettent le remplacement pendant l'arrêt du réacteur;
- qu'ils soient résistants à la corrosion atmosphérique, aux variations cycliques de température et à l'usure;
- qu'ils ne provoquent pas de tension sur les câbles des capteurs.

4.2.1.3 Vérification de leur bon fonctionnement

Les caractéristiques électriques internes des capteurs doivent être contrôlées à chaque arrêt de tranche, et leur sensibilité doit être contrôlée au minimum tous les cinq ans (en les montant sur un pot vibrant excité à deux fréquences au moins dans la bande de fréquences utilisée et pour deux niveaux d'excitation).

4.2.2 Conditionnement du signal

La chaîne de mesure est généralement composée d'un préamplificateur (uniquement pour les accéléromètres) situé près du capteur dans l'espace annulaire, et d'un amplificateur dans le local électrique du système de surveillance.

4.2.2.1 Préamplificateur (uniquement pour les accéléromètres)

Le préamplificateur doit être compatible avec les conditions ambiantes à l'endroit de l'installation. Il doit garantir l'adaptation d'impédance et doit transmettre le signal à l'amplificateur sans être perturbé par des interférences.

4.2.2.2 Amplificateur

L'amplificateur doit permettre:

- le réglage (en continu) de la sensibilité du capteur, si ce n'est pas déjà fait au niveau du préamplificateur;
- l'amplification du signal;
- le filtrage passe-bande entre 1 Hz et 100 Hz ou entre 1 Hz et 200 Hz (selon le type de capteur) ou la soustraction de la composante continue et le filtrage passe-bas jusqu'à 100 Hz ou 200 Hz.

L'amplificateur doit délivrer un signal découplé, isolé, protégé contre les courts-circuits. Sa sortie doit être compatible avec l'équipement du système de surveillance.

Il convient de régler l'amplificateur de telle façon que l'amplitude du signal corresponde à environ 20 % de la pleine échelle. Sauf en cas de variation du niveau du bruit de fond généré par le réacteur, il convient de garder ce même réglage tout au long de la campagne combustible.

4.2.1.2 Attachment of sensors

All means of attaching sensors (screws, clamps, glue) may be used, on condition that:

- they do not affect the integrity of the vessel;
- they permit replacement during reactor shutdown;
- they are not significantly affected by atmospheric corrosion or by thermal cycling or wear;
- they do not cause tension in the sensor cables.

4.2.1.3 Verification of correct functioning

The internal electrical characteristics of the sensors shall be checked during each unit outage, and their sensitivity checked at least once every five years (by mounting on a vibrating exciter excited at at least two frequencies in the frequency range used and for two levels of excitation).

4.2.2 Signal conditioning

The measurement system generally comprises a preamplifier (only for accelerometers) located near the sensor in the containment annulus and an amplifier in the instrumentation room of the monitoring system.

4.2.2.1 Preamplifier (only for accelerometers)

The preamplifier shall be compatible with the ambient conditions prevailing at the point of installation. It shall ensure impedance matching and shall transmit the signal to the amplifier without being affected by interference.

4.2.2.2 Amplifier

The amplifier shall enable:

- continuous adjustment of the sensitivity of the sensor, if this is not already performed at the preamplifier level;
- signal amplification;
- band-pass filtering between 1 Hz and 100 Hz or 1 Hz and 200 Hz (depending on the sensor type) or d.c. off-set and low-pass filtering up to 100 Hz or 200 Hz.

The amplifier shall deliver decoupled, isolated signals, protected against short circuits. Its output shall be compatible with the monitoring system equipment.

The amplifier should be set so that the signal amplitude corresponds to around 20 % of full scale. Except in the case of variation in the background noise generated by the reactor, this setting should remain the same throughout the fuel cycle.

4.3 Utilisation de signaux d'un système multi-capteurs

4.3.1 Considérations générales

La surveillance vibratoire des internes des réacteurs doit être réalisée avec les techniques décrites dans les paragraphes précédents, si les causes et l'évolution à long terme des anomalies sont connues d'avance ou si les anomalies inconnues sont importantes et significatives. Cependant, comme le montre l'expérience, pour des besoins de diagnostic des informations additionnelles peuvent être très utiles, tout particulièrement lorsqu'il convient de détecter les anomalies de façon précoce. Plusieurs effets sur les signatures peuvent perturber les diagnostics. Les signatures peuvent être modifiées par :

- des changements de l'excitation ou des effets opérationnels;
- des variations à long terme des fréquences propres aux structures mécaniques;
- des superpositions de fréquences de résonance forcées et propres;
- des interactions réciproques de composants causées par des changements au niveau des supportages de structures et/ou une dégradation/défaillance d'un composant.

En général, les vibrations des internes du réacteur ne peuvent pas être séparées du comportement vibratoire de la cuve du réacteur et des boucles qui y sont connectées, car tous les composants du circuit primaire (c'est-à-dire la cuve du réacteur, les internes de la cuve, les boucles de refroidissement, et les composants du circuit primaire incluant les supportages) se comportent comme un système vibrant multi-masses couplé. Selon l'importance du couplage, les effets et changements au niveau des conditions de supportage suite à une dégradation ont une influence sur les signatures surveillées.

Dans le but de fournir une bonne base pour des diagnostics fiables de dégradations de structures des internes du réacteur et également pour permettre la détection de dégradations des supportages du circuit primaire, il peut donc également être très utile d'intégrer au système de surveillance des capteurs mesurant les vibrations des boucles du circuit primaire (anomalies vibratoires extérieures à la cuve) et des capteurs mesurant les fluctuations de pression du liquide de refroidissement du réacteur (changements de l'excitation). En conclusion, l'approche la plus efficace pour une détection et un diagnostic en fonctionnement de dégradations de structures est la surveillance vibratoire basée sur des signaux d'un système multi-capteurs. Il convient qu'un tel système utilise des signaux de vibrations de la cuve, de bruit neutronique, de vibrations des boucles primaires et de pression du liquide de refroidissement. Une configuration de capteurs type est décrite en 4.3.2 et est représentée à la figure 14.

4.3.2 Système multi-capteurs type

Dans un système multi-capteurs pour la surveillance et le diagnostic de défauts, non seulement les caractéristiques et les signatures individuelles des signaux des capteurs peuvent être utilisées, mais également les informations apportées par les relations réciproques et les corrélations entre les signaux des différents capteurs.

Dans un système multi-capteurs type, on utilise de préférence les signaux de vibrations de la cuve du réacteur (capteurs de déplacement absolu ou accéléromètres) et de bruit neutronique hors coeur, ce qui est fondamentalement en accord avec les recommandations de 4.1 et 4.2. Les signaux des capteurs de déplacement relatif sur les boucles sont intégrés au système pour permettre l'évaluation de l'effet des changements de vibrations des boucles et des composants du circuit primaire sur les signatures des signaux de déplacement absolu et de bruit neutronique. Les signaux de capteurs de pression dynamique montés sur la paroi des boucles sont utilisés pour l'évaluation des changements vibratoires causés par des modifications de l'excitation par l'intermédiaire du liquide de refroidissement. En plus, les capteurs de déplacement relatif peuvent fournir des informations sur des changements mécaniques (dégradation) des composants du circuit primaire, en particulier des informations sur des changements au niveau des supportages et des contraintes.

4.3 Use of the signals of a multi-sensor system

4.3.1 In general

The vibration monitoring of reactor internals shall be performed with techniques described in the previous subclause, if the causes and long term behaviour of the anomalies are known or if unknown anomalies are strong and significant. As shown by operational experience, however, for diagnosis purposes additional information can be very helpful, especially since the anomalies should be detected at an early stage. Several influences on the signatures can disturb the diagnosis. Signatures can be changed because of:

- changed excitation or operational influences;
- long-term shifts of natural frequencies of mechanical structures;
- superposition of forced and natural resonance frequencies;
- mutual component interactions caused by changes in structural supports and/or component degradation/failure.

In general, vibration of reactor internals can not be separated from the vibrational behaviour of the reactor vessel and the connected loops, since all the components of the primary circuit (i.e. reactor vessel, vessel internals, coolant loops, and primary circuit components including supports) behave as a vibrating coupled multi-mass system. Depending on the degree of coupling, degradation effects and changes in supporting conditions influence the monitored signatures.

In order to provide a good basis for reliable diagnoses of structural degradation of reactor internals and also to allow detection of degradation of primary circuit structural supports, it can therefore be very useful to also incorporate sensors measuring the vibrations of the primary circuit loops (vibratory anomalies from outside the vessel) and sensors measuring the pressure fluctuations of the reactor coolant (changes in the excitation) in the monitoring system. In conclusion, the most effective approach for on-line structure degradation detection and diagnosis is vibration monitoring based on the signals of a multi-sensor system. Such a system should use the signals of vessel vibration, neutron noise, primary loop vibrations and coolant pressure. A typical sensor configuration is described in 4.3.2 and is shown in figure 14.

4.3.2 Typical multi-sensor system

In a multi-sensor system for monitoring and fault diagnosis, not only the characteristics and signatures of the individual sensor signals may be used, but also the information provided by the mutual relationships and correlations between the signals of the different sensors.

In a typical multi-sensor system, it is preferable to use the vibrations of the reactor vessel (absolute displacement sensors or accelerometers) and the ex-core neutron noise signals, which basically is in agreement with the requirements of 4.1 and 4.2. To be able to evaluate the influence of vibration changes of the loops and the primary circuit components on the signatures of the absolute displacement signals and neutron noise, the signals of relative displacement sensors at the loops are integrated in the system. For evaluation of vibratory changes caused by changes in the vibration excitation via the coolant, the signals of dynamic pressure sensors mounted at the wall of the loops are used. In addition, relative displacement sensors can provide information on mechanical changes (degradation) in the primary circuit components, in particular information on changed structural supports and stresses.

Les principales caractéristiques des capteurs utilisés dans un système multi-capteurs type de la figure 14 sont les suivantes:

a) Capteurs de déplacement absolu

Les vibrations de la cuve du réacteur sont mesurées par quatre capteurs de déplacement absolu sensibles dans la direction verticale placés à 90° les uns des autres sur le couvercle de cuve. Les capteurs peuvent être calibrés à distance et sont sensibles à des fréquences de 0,5 Hz et plus.

b) Instrumentation de flux neutronique

Ici les huit signaux de bruit neutronique de l'instrumentation du flux neutronique hors cœur sont tous utilisés. Le conditionnement du signal est fait de telle façon que toute la bande de fréquence nécessaire à la surveillance est disponible. La composante dynamique du flux neutronique est découplée au moyen d'un filtre passe-haut ou d'un module de compensation.

c) Capteurs de déplacement relatif

Dans le système multi-capteurs de la figure 14, seize capteurs de déplacement relatif qui peuvent être calibrés à distance sont utilisés. Typiquement, des capteurs de vibrations à induction avec des palpeurs sont utilisés. Les vibrations de chaque pompe primaire sont mesurées dans un plan horizontal, les vibrations des boucles entre la cuve du réacteur et le générateur de vapeur le sont dans un plan vertical, orthogonalement à l'axe de la boucle. Les capteurs de déplacement relatif sont toujours montés par paire à 90° et mesurent des déplacements relatifs par rapport au béton.

d) Capteurs de pression

Les fluctuations de pression du liquide de refroidissement dans les boucles sont mesurées par des capteurs piézo-électriques. Ces capteurs sont résistants à l'irradiation et à la température et sont montés directement sur la paroi de la boucle, c-à-d. sans guide d'onde. Sur chaque boucle, un capteur de pression est monté sur la branche froide de la boucle, entre la cuve du réacteur et la pompe du fluide de refroidissement principal. Un capteur supplémentaire est monté sur la branche chaude d'une boucle, entre la cuve du réacteur et le générateur de vapeur.

Les capteurs de pression fournissent principalement des informations sur les phénomènes hydrauliques (comme les résonances du liquide). De plus, les capteurs sur la branche froide peuvent fournir des informations sur les pompes primaires et sur l'excitation des internes de cuve, et les capteurs sur la branche chaude peuvent fournir des informations sur la réponse vibratoire des internes de cuve.

4.3.3 Caractéristiques de l'instrumentation

Les caractéristiques de l'instrumentation utilisée dans un système multi-capteurs type sont:

a) Capteurs de déplacement absolu

Les recommandations générales sont décrites en 4.2; d'autres caractéristiques sont:

- principes de mesure: masse sismique et émetteur inductif
- grandeur mesurée: déplacement dynamique absolu de la vibration
- étendue de mesure en amplitude: $\pm 0,8$ mm
- valeur normale attendue: ± 30 μ m
- plage de fréquence (convertisseur inclus): 0,5 Hz à 140 Hz (erreur sur l'amplitude ± 10 %)

b) Capteurs neutroniques à ionisation

Les caractéristiques générales sont décrites en 4.1. Dans le système multi-capteurs de la figure 14, pour une meilleure détection d'anomalies locales et pour améliorer les capacités du diagnostic, huit capteurs hors cœur sont utilisés.

The main features of the sensors used in the typical multi-sensor system of figure 14 are the following:

a) Absolute displacement sensors

The reactor vessel vibrations are measured by four vertically sensitive absolute displacement sensors on the reactor vessel cover spaced at 90° intervals to each other. The sensors can be calibrated remotely and are sensitive to frequencies of 0,5 Hz and above.

b) Neutron flux instrumentation

Here all eight neutron noise signals of the ex-core neutron flux instrumentation are used. The signal conditioning is such that the whole frequency range needed for monitoring is provided. The dynamic component of the neutron flux is decoupled by means of a high-pass filter or a compensation unit.

c) Relative displacement sensors

In the multi-sensor system of figure 14, sixteen relative displacement sensors are used, which can be calibrated remotely. Typically, inductive vibration sensors with feelers are applied. The vibrations of each main coolant pump are measured in a horizontal plane and the loop vibrations between reactor vessel and steam generator in a vertical plane orthogonal to the axis of the loop. The relative displacement sensors are always mounted pairwise at 90° from each other and measure displacement relative to the concrete.

d) Pressure sensors

The pressure fluctuations of the coolant in the loops are measured by piezoelectric sensors. These sensors are radiation and temperature resistant and mounted directly at the loop wall, i.e. without sensing lines. In each loop, a pressure sensor is mounted at the cold leg between the reactor vessel and the main coolant pump. An additional sensor is mounted at the hot leg of a loop, i.e. between reactor vessel and steam generator.

Primarily the pressure sensors provide information on hydraulic phenomena (such as fluid resonances). In addition, the sensors in the cold leg can provide information about the main coolant pumps and the excitation of the vessel internals while the sensors in the hot leg can provide information on the vibration response of the vessel internals.

4.3.3 Instrumentation characteristics

The characteristics of the instrumentation used in a typical multi-sensor system are:

a) Absolute displacement sensors

The general requirements are described in 4.2; further characteristics are:

- measuring principles: seismic mass and inductive transmitter
- measuring value: dynamic absolute vibration displacement
- amplitude range: $\pm 0,8$ mm
- normal expected values: ± 30 μ m
- frequency range (including converter): 0,5 Hz – 140 Hz (magnitude error ± 10 %)

b) Ionisation neutron detectors

The general characteristics are described in 4.1. In the multi-sensor system of figure 14 eight ex-core detectors are used for better detection of local anomalies and improvement of the diagnosis capabilities.

c) Capteurs de déplacement relatif (vibrations de boucle)

Les recommandations générales sont décrites en 4.3.2; d'autres caractéristiques sont:

- principe de mesure: émetteur inductif
- grandeur mesurée: déplacement dynamique et statique relatif
- étendue de mesure en amplitude: ± 20 mm ou ± 50 mm (selon la centrale)
- plage de fréquence: 0 Hz à 200 Hz (erreur sur l'amplitude de ± 10 %)
- température ambiante: 80 °C
- accélération maximale (sur le noyau du capteur): $a_{\max} = 30 \text{ m/s}^2$
- vibration relative maximale attendue (près de la pompe primaire): approximativement $\pm 150 \text{ } \mu\text{m}$
- vibration relative maximale attendue (près du générateur de vapeur): approximativement $\pm 20 \text{ } \mu\text{m}$

d) Capteurs de pression du liquide de refroidissement

Les recommandations générales sont décrites en 4.3.2; d'autres caractéristiques sont:

- principe de mesure: cristal piézo-électrique
- grandeur mesurée: pression dynamique
- sensibilité: 110 pC/bar
- fréquence propre du cristal: 50 kHz
- température ambiante: 350 °C
- pression maximale: 250 bar
- fluctuation de pression maximale attendue: approximativement $\pm 0,5$ bar

4.3.4 Conditionnement du signal

Pour le système multi-capteurs décrit en 4.3, on utilise les système de conditionnement du signal suivants:

- amplificateur de fréquence porteuse, amplificateur correcteur et module de calibration pour les signaux des capteurs de vibration absolue;
- filtre passe-haut ou module de compensation et un amplificateur à courant alternatif pour les signaux de flux neutronique;
- amplificateur de fréquence porteuse et module de calibration pour les signaux des capteurs de vibration relative;
- amplificateur de charges, modules de calibration et de filtrage pour les signaux des capteurs de pression.

4.4 Système de surveillance

4.4.1 Equipement de surveillance

Le système de surveillance doit comprendre un module pour l'élaboration des fonctions spectrales, connecté à un ordinateur permettant des traitements par un logiciel spécialisé avec les caractéristiques de fonctionnement standard suivantes:

- dynamiques des entrées compatibles avec les signaux des capteurs: typiquement de 20 mV à 10 V
- bande d'analyse réglable: jusqu'à 0 Hz à 200 Hz
- résolution verticale (sur l'amplitude): minimum 1 000 points
- résolution horizontale (sur la fréquence): minimum 400 points
- conversion analogique/numérique: minimum 12 bits
- choix de l'échelle verticale: linéaire or logarithmique
- précision sur la phase: $\pm 2,5^\circ$

c) Relative displacement sensors (loop vibration)

The general requirements are described in 4.3.2; further characteristics are:

- measuring principle: inductive transmitter
- measuring value: dynamic and static relative displacement
- amplitude range: ± 20 mm or ± 50 mm (depending on the plant)
- frequency range: 0 Hz – 200 Hz (magnitude error ± 10 %)
- environment temperature: 80 °C
- maximum acceleration (at the coil core): $a_{\max} = 30 \text{ m/s}^2$
- maximum expected relative vibration (near coolant pump): approximately $\pm 150 \text{ } \mu\text{m}$
- maximum expected relative vibration (near steam generator): approximately $\pm 20 \text{ } \mu\text{m}$

d) Coolant pressure sensors:

The general requirements are described in 4.3.2; further characteristics are:

- measuring principle: piezoelectric crystal
- measured value: dynamic pressure
- sensitivity: 110 pC/bar
- crystal eigenfrequency: 50 kHz
- environment temperature: 350 °C
- maximum pressure: 250 bar
- maximum expected pressure fluctuation: approximately $\pm 0,5$ bar

4.3.4 Signal conditioning

For the multi-sensor system described in 4.3 the following signal conditioning systems are applied:

- carrier frequency amplifier, correcting amplifier and calibration unit for the signals of the absolute vibration sensors;
- high-pass filter or compensation units and a.c. amplifier for the neutron flux signals;
- carrier frequency amplifier and calibration unit for the signals of the relative vibration sensors;
- charge amplifier, calibration and filter units for the signals of the pressure sensors.

4.4 Monitoring system

4.4.1 Monitoring equipment

The monitoring system shall comprise a unit for working out spectral functions which is connected to a computer enabling processing by specialized software with the following standard performance characteristics:

- dynamic characteristics of inputs compatible with the sensor signal: typically 20 mV to 10 V
- adjustable analysis band: up to 0 Hz – 200 Hz
- vertical resolution (on the magnitude): 1 000 points minimum
- horizontal resolution (on the frequency): 400 points minimum
- analog/digital conversion: 12 bits minimum
- choice of vertical scale: linear or logarithmic
- accuracy on phase: $\pm 2,5^\circ$

Il convient de disposer d'un module d'enregistrement (pour un enregistreur analogique la dynamique des entrées se situe typiquement entre 20 mV et 10 V et l'erreur maximale autorisée à la lecture est de $\pm 5\%$) pendant les différentes phases de la surveillance décrite à l'article 5. Cela permet en particulier aux spécialistes de réaliser des analyses complémentaires, après la mesure. Il convient que le module d'enregistrement ait au moins six voies de mesure (quatre pour le bruit neutronique normalisé, deux pour les signaux de vibrations de la cuve). Si le module d'enregistrement est numérique, il convient qu'il soit équipé d'un convertisseur analogique/numérique de 12 bits, avec une fréquence d'échantillonnage compatible avec la bande d'analyse.

Pendant l'enregistrement, il convient de régler le module d'enregistrement de telle façon que le signal corresponde à environ 20 % de la gamme d'entrée. Les noms des signaux, le réglage des voies de mesure et la gamme d'enregistrement doivent être donnés.

Il convient également d'intégrer deux autres types d'équipements dans le système:

- un module d'affichage: les fonctions d'affichage peuvent être assurées par l'analyseur de spectre;
- un module de calibration des voies de mesure de vibrations de la cuve: pour les accéléromètres cela peut être un générateur d'une tension sinusoïdale à deux fréquences fixes entre 2 Hz et 40 Hz et à au moins deux niveaux de tension (précision sur le niveau exigée: 5 %); les capteurs de déplacement sont disponibles avec un calibrateur à distance.

NOTE – Un module analogique donnant la fluctuation du courant dI/I peut en continu détecter des anomalies, si la détection est basée sur l'amplitude de dI/I .

4.4.2 Logiciel de surveillance

Le logiciel doit fournir les fonctions suivantes:

- fonctions spectrales (voir 4.4.3 et annexe A);
- conversion des signaux en unités physiques;
- calcul de la valeur efficace sur la bande d'analyse (optionnel);
- validation des signaux sur la base de leur valeur efficace totale (optionnelle);
- marquage des pics sur toutes les fonctions spectrales;
- calcul des déplacements efficaces des structures, définis en annexe A (optionnel);
- comparaison des autospectres normalisés avec leur référence enregistrée au début de la campagne combustible, indication et localisation en fréquence des déviations possibles (par rapport à un seuil prédéfini) entre chaque autospectre courant et sa référence (voir 5.2.2);
- validation suivie d'une impression papier des paramètres (gains des chaînes de mesure, concentration en bore, usure du combustible);
- stockage des signatures spectrales et des paramètres d'exploitation de la tranche pour permettre des comparaisons ultérieures;
- impression papier des signatures spectrales, de leurs références et des résultats des calculs (voir exemples aux figures 15 et 16).

Le logiciel peut établir un diagnostic, dont la démarche générale est décrite en 5.1.3.

4.4.3 Mode d'acquisition spectrale

L'acquisition doit être réalisée dans les conditions suivantes:

- dans une bande de fréquence basse, qui ne doit pas être changée durant toute la vie de la centrale (fréquence d'analyse 40, 50 ou 100 Hz, selon les phénomènes surveillés et les capteurs);
- résolution fréquentielle inférieure à 1 % de la plus grande fréquence des phénomènes surveillés;
- de préférence avec une fenêtre de pondération de type Hanning;
- au moins 64 moyennes;
- sommation avec le même poids pour tous les spectres;
- recouvrement des fenêtres temporelles d'acquisition de deux spectres consécutifs.

A recording module (for an analog recorder having input dynamic characteristics typically between 20 mV and 10 V and maximum authorized error in reading of ± 5 %) should be available during the different monitoring phases described in clause 5. In particular, this enables specialists to perform complementary analyses after the measurement. The recording module should have at least six measurement channels (four for normalized neutron noise, two for vessel vibration signals). If the recording module is digital, a 12-bit analog/digital converter should be provided, with a sampling frequency compatible with the analysis range.

During recording, the recording module should be adjusted so that the signal corresponds to around 20 % of the input range. The names of the signals, the adjustments for measurement lines and the recording range shall be given.

Two other types of equipment should also be integrated in the system:

- a display module: the display function may be performed by a spectrum analyser;
- a module for calibrating the vessel vibration measuring lines; for accelerometers this may be a generator of a sinusoidal voltage at two fixed frequencies between 2 Hz and 40 Hz and at at least two levels of voltage (required level accuracy: 5 %); displacement transducers are available with remote calibration.

NOTE – An analog device giving the fluctuation of the *dili* current can continuously detect anomalies, as detection is based on the *dili* amplitude.

4.4.2 Monitoring software

The software shall provide the following functions:

- spectral functions (see 4.4.3 and annex A);
- conversion of signals into physical units;
- calculation of the r.m.s. value on the analysis band (optional);
- validation of signals on the basis of their total r.m.s. value (optional);
- marking of peaks on all spectral functions;
- calculation of r.m.s. displacement of structures as defined in annex A (optional);
- comparison of normalized autospectra with their references recorded at the beginning of the fuel cycle, indication and localization in frequency of possible deviations (in relation to a predetermined threshold) between each current autospectrum and its reference (see 5.2.2);
- validation followed by print-out of parameters (measurement line gains, boron concentration, fuel burnup);
- storage of spectral signatures and of the unit operation parameters to enable subsequent comparisons;
- print-out of spectral signatures, their references and the results of calculations (see examples in figures 15 and 16).

The software may establish a diagnosis; the general approach is described in 5.1.3.

4.4.3 Spectral acquisition mode

Acquisition shall be performed under the following conditions:

- in a low frequency range, that shall not be changed during the whole plant life (40, 50 or 100 Hz analysis frequency, depending on the monitored phenomena and on the sensors);
- frequency resolution less than 1 % of the highest frequency of the monitored phenomena;
- preferably a Hanning weighting window;
- at least 64 mean values;
- summation with the same weight for all spectra;
- overlapping of temporal acquisition windows of two consecutive spectra.

4.4.4 Etat du réacteur

Il convient que le système soit opérationnel au début des essais précritiques à chaud.

A l'exception de la phase de démarrage, il convient de réaliser toutes les acquisitions spectrales en fonctionnement stable de la tranche et, si possible:

- à puissance nucléaire stable (± 1 %) et élevée (95 % minimum);
- en l'absence de tout mouvement de grappes de commande;
- en dehors des périodes de dilution ou d'injection de bore.

Ces conditions sont réunies quand, tous les mois, les opérateurs de la centrale réalisent les cartes de flux.

5 Procédures de surveillance

5.1 Etudes préliminaires pour la mise en service du système de surveillance du réacteur

Pour surveiller les internes de réacteur, les tâches préliminaires suivantes doivent être réalisées:

5.1.1 Etudes théoriques, pouvant être confirmées par des essais sur maquette

L'objectif des études théoriques est de calculer les modes propres des différentes structures.

Une analyse modale est essentielle pour la prédiction du comportement vibratoire des structures internes et l'évaluation des effets sur les signatures spectrales de chaque dégradation (telle que la perte de fonction de l'anneau de calage et la rupture des attaches de l'écran thermique).

Les résultats des études théoriques peuvent être confirmés par des simulations de défauts sur maquette: excitation des internes (reproduites à échelle réduite) instrumentés, aussi bien en situation normale qu'anormale.

5.1.2 Qualification pendant les essais à chaud

Dans le but de:

- qualifier le bon comportement des internes par mesure directe (comparaison avec les résultats des calculs et des essais sur maquette en situation normale);
- corréliser les signaux des capteurs sur les internes et la cuve, et ainsi préparer la tâche décrite en 5.1.3 et démontrer que les vibrations des internes peuvent être détectées par des capteurs extérieurs à la cuve (voir par exemple annexe C);

sur chaque nouveau type de réacteur, pendant les essais préopérationnels à chaud, les structures internes doivent être instrumentées directement (des capteurs spéciaux résistants aux conditions de température et de pression sont temporairement soudés directement sur les structures) ainsi qu'à l'extérieur de la cuve.

5.1.3 Identification des mouvements au moment du démarrage

Dans le but de permettre les tâches décrites en 5.1.1 à 5.1.3 et ainsi permettre la définition des critères opérationnels normaux et des seuils d'alerte correspondant aux fréquences et amplitudes de mouvement, pour chaque nouveau type de réacteur, dès que la puissance nucléaire atteint 30 % (phase stable), une analyse spectrale approfondie doit être réalisée (auto et interspectres) sur tous les signaux. Les mouvements des structures doivent être identifiés et contrôlés.

4.4.4 Reactor conditions

The system should be operational at the beginning of the hot precritical tests.

With the exception of the start-up phase, all spectral acquisitions should be performed during stable unit operation and, if possible:

- at stable (± 1 %) and high (95 % minimum) nuclear power;
- in the absence of any movement of control rods;
- outside periods of boron dilution or injection.

These conditions are met when monthly flux maps are made by the plant operators.

5 Monitoring procedures

5.1 Studies preliminary to setting up the reactor monitoring system

In order to monitor reactor internals, the following preliminary tasks shall be performed:

5.1.1 Theoretical studies, which may be confirmed by mock-up tests

The purpose of the theoretical studies is to calculate the natural modes of the different structures.

A modal analysis is essential for prediction of the vibratory behaviour of internal structures and evaluation of the effects on the spectral signatures of any degradation (such as loss of function of the hold-down spring and rupture of thermal shield attachments).

The results of the theoretical studies may be confirmed on a defect simulation mock-up: excitation of internals (reproduced on a reduced scale) which are instrumented and in both a normal and abnormal situation.

5.1.2 Qualification during hot tests

In order to:

- qualify the correct behaviour of the internals by direct measurement (comparison with results from calculations and mock-up tests in a normal situation);
- correlate the signals from sensors on the internals and the vessel, thereby preparing for the task described in 5.1.3 and prove that internal vibrations can be detected by sensors outside the vessel (see for example annex C);

on each new reactor type, during the hot pre-operation tests, the internal structures shall be instrumented directly (special transducers resistant to temperature and pressure conditions and temporarily welded on to the structures) and also outside the vessel.

5.1.3 Identification of movement at the time of start-up

In order to enable the tasks described in 5.1.1 to 5.1.3 and so the definition of normal operation criteria and alert thresholds with respect to movement frequencies and magnitudes, on each new reactor type, as soon as nuclear power reaches 30 % (stable phase), a thorough spectral analysis shall be performed (mono- and cross-spectrum) on all signals. Movements of the structures shall be identified and checked.

Ci-dessous, un exemple de procédure de diagnostic:

1. identifier les pics dominants sur les autospectres et dans les bandes de fréquence où les modes vibratoires sont attendus;
2. vérifier que les critères sont en conformité avec les résultats de 5.1.2;
3. comparer les valeurs de fréquence et d'amplitude des pics avec les valeurs attendues (résultats de 5.1.1 et 5.1.2).

Comme indiqué dans la note 1 de l'article B.2, il convient que les critères sur l'amplitude du bruit neutronique tiennent compte de l'effet de la consommation du combustible sur le niveau des signatures durant la campagne combustible.

5.2 Phase de surveillance

5.2.1 Premier démarrage du réacteur (30 % de puissance)

Les mêmes opérations qu'en 5.1.3 doivent être réalisées (comparaison des valeurs de fréquence et d'amplitude avec les critères de bon fonctionnement établis en 5.1.1 à 5.1.3). En cas d'anomalie, il convient d'enregistrer tous les signaux de surveillance.

5.2.2 Pendant la campagne combustible

Le principe général des procédures de surveillance est de vérifier la conformité aux critères de bon fonctionnement et l'absence de variations anormales dans le temps des phénomènes.

Une vue d'ensemble de la procédure est donnée ci-dessous.

- a) Au début de la campagne combustible (état de référence) ou après chaque réparation importante sur les internes

Quelques jours après que le réacteur ait atteint un état stationnaire de puissance du réacteur (état de référence), il convient d'enregistrer tous les signaux en tant que référence pour la campagne combustible courante (état zéro vibratoire), puis d'effectuer les mêmes opérations qu'en 5.1.3:

- comparaison des valeurs de fréquence et d'amplitude avec les critères de 5.1.3;
- si ce n'est pas la première campagne combustible, comparaison des valeurs de fréquence et d'amplitude avec celles obtenues au début et à la fin de la campagne précédente (objectif: détecter des changements par rapport à l'état de référence de la campagne précédente et des défauts sur les internes liés à leur démontage pendant l'arrêt pour rechargement);
- comparaison des valeurs de fréquence et d'amplitude avec les seuils d'alerte.

- b) Une fois par mois (ou tous les 30 JEPP: 30 jours équivalents pleine puissance)

Une analyse spectrale multi-voies de deux signaux neutroniques (au moins) situés à un angle de 90° et de deux signaux de vibrations de la cuve peut être effectuée. Dans ce cas, les mouvements de structures doivent être contrôlés comme suit:

1. identifier les pics prédominants sur les spectres et dans les bandes de fréquence où les modes vibratoires sont attendus;
2. comparer les valeurs de fréquence et d'amplitude des pics surveillés avec les seuils d'alerte.

- c) Une fois par trimestre (ou tous les 90 JEPP)

- Une analyse spectrale monovoie de tous les signaux de surveillance doit être effectuée.
- Les mêmes opérations que pour l'analyse mensuelle doivent être réalisées.

Below is one example of the diagnosis procedure:

1. identify the dominant peaks in the autospectra and frequency bands where the vibratory modes are expected;
2. verify that the criteria are in conformity with the results of 5.1.2;
3. compare the frequency and magnitude values of the peaks with the expected values (results of 5.1.1 and 5.1.2).

As stated at the end of B.2, note 1, the neutron noise magnitude criteria should consider the effect of fuel consumption on signature levels during the fuel cycle.

5.2 Monitoring phase

5.2.1 First start-up of the reactor (30 % power)

The same operations as in 5.1.3 shall be performed (comparing the frequency and magnitude values with the criteria for correct operation established in 5.1.1 to 5.1.3). In the event of an anomaly, all monitoring signals should be recorded.

5.2.2 During the fuel cycle

The general principle of monitoring procedures is to verify compliance with the criteria for correct operation and the absence of abnormal variations in the phenomena over time.

An overview of the procedure is given below.

- a) At the beginning of the fuel cycle (reference state) or after all major repairs on internals

A few days after the reactor has reached stationary reactor power conditions (reference state), all signals should be recorded as a reference for the current fuel cycle (zero vibration state), followed by the same operations as in 5.1.3:

- comparing the frequency and magnitude values with the criteria of 5.1.3;
- and, if this is not the first reactor fuel cycle, comparing the frequency and magnitude values with those obtained at the beginning and the end of the preceding cycle (objective: to detect changes in comparison to the reference state of the preceding cycle and defects on internals linked to their demounting during shutdown for refuelling);
- and, comparing the frequency and magnitude values with the warning thresholds.

- b) Once per month (or every 30 EFPDs: 30 equivalent full power days)

A multi-channel spectral analysis of (at least) two neutron signals at an angle of 90° and two vessel vibration signals may be carried out. In this case movement of structures shall be checked as follows:

1. identify dominant peaks in the spectra and the frequency bands where the vibratory modes are expected;
2. compare the frequency and magnitude values of the monitored peaks with the warning thresholds.

- c) Once quarterly (or every 90 EFPDs)

- A mono-channel spectral analysis of all monitoring signals shall be carried out.
- The same operations as for the monthly analysis shall be performed.

Il convient également de réaliser une analyse spectrale multi-voies (inter-voies) une fois par trimestre ou au moins trois fois pendant la campagne combustible: au début, au milieu et à la fin de la campagne combustible.

d) A la fin de la campagne combustible

- Une analyse spectrale approfondie (mono- et inter-voies) doit être effectuée et il convient d'enregistrer tous les signaux de surveillance (objectif: avoir le maximum d'informations pour l'arrêt de tranche et être en mesure d'effectuer les opérations de 5.2.2 a)).
- Les mêmes opérations qu'en 5.1.3 doivent être réalisées.
- Un bilan du comportement vibratoire des structures internes pendant la campagne combustible doit être dressé.

e) Dans le cas où les critères sur l'amplitude, la fréquence ou les seuils d'alerte sont dépassés, si un changement anormal est détecté, s'il y a une non-conformité dans les règles sur la cohérence et la phase, ou s'il y a une allure de signature spectrale inhabituelle

- Une analyse spectrale approfondie doit être effectuée et tous les signaux enregistrés.
- Il convient de consulter des spécialistes.

S'il est avéré qu'aucune anomalie n'est en cause, les critères doivent être changés (si nécessaire), en particulier ceux sur l'amplitude.

f) Pendant l'arrêt pour rechargement

Les caractéristiques fonctionnelles des chaînes de mesure des capteurs de vibrations de la cuve doivent être contrôlées, depuis le capteur jusqu'à la sortie de l'amplificateur.

5.3 Phase de diagnostic

Le logiciel de surveillance sur site peut aider à l'interprétation des phénomènes; mais il convient néanmoins que chaque diagnostic soit confirmé par un spécialiste. Ceci peut être fait sur la base de signaux bruts (enregistrés, si nécessaire) et peut nécessiter des analyses de bruit neutronique en coeur ou de signaux d'autres capteurs (fluctuations de pression, par exemple).

6 Documentation

6.1 Mise en service initiale

Synthèses des études théoriques et sur maquette: caractéristiques des modes vibratoires (fréquences, amplitudes) en situations normales et anormales.

Rapport des essais d'acceptation pour l'instrumentation externe de cuve (pour chaque tranche donnée): sensibilité des capteurs et montage (orientation, fixation, etc.), résultats d'inspections visuelles de l'installation, affectation des chaînes de mesure, résultats des essais d'acceptation électrique (chaînes de mesure, préamplificateur, amplificateur), plan des chemins de câblage.

Dossier technique du système: caractéristiques de l'installation.

Procédure de surveillance: réglage du système, procédures d'utilisation.

Documentation du logiciel de surveillance: dossier de conception, guide d'utilisation.

Synthèses des essais de démarrage sur un nouveau type de réacteur: caractéristiques des modes vibratoires pendant les essais à chaud et à 30 % de puissance.

A multi-channel spectral analysis (cross-channel) should also be performed once quarterly or at least three times during the fuel cycle: beginning, middle and end of the fuel cycle.

d) At the end of the fuel cycle

- A thorough spectral analysis (mono- and cross-channel) shall be carried out and all monitoring signals should be recorded (objective: to have a maximum of information for outage and to be able to carry out the operations of 5.2.2 a)).
- The same operations as in 5.1.3 shall be performed.
- An assessment of the vibratory behaviour of the internal structures during the fuel cycle shall be drawn up.

e) In the event that magnitude or frequency criteria or warning thresholds are exceeded, if an abnormal change is detected, if there is non-conformity of the coherence and phase laws, or if there is an unusual spectral signature shape

- A thorough spectral analysis shall be carried out and all signals recorded.
- Specialists should be consulted.

If no anomaly is found to be responsible, the criteria shall be changed (if necessary), in particular, those of magnitude.

f) During shutdown for refuelling

The functional characteristics of the measurement lines of the vessel vibration sensors from the sensor to the amplifier output shall be checked.

5.3 Diagnosis phase

While on-site monitoring software may be of help in interpreting phenomena, any diagnosis should still be confirmed by specialists. This may be done on the basis of raw signals (recorded if necessary). It may require analysis of in-core neutron noise or of signals from other sensors (fluctuations in pressure, for example).

6 Documentation

6.1 Initial entry into service

Syntheses of theoretical and mock-up studies: characteristics of vibratory modes (frequencies, magnitudes) in normal and abnormal situations.

Reports on acceptance tests for external vessel instrumentation (for each given unit): sensor sensitivity and mounting (orientation, attachment, etc.), results of visual inspection of the installation, measurement line assignment, results of electric acceptance tests (measurement lines, preamplifier, amplifier), cable routing plan.

Technical system file: equipment characteristics.

Monitoring procedure: system adjustments, procedures for use.

Monitoring software documentation: engineering file, user's guide.

Syntheses of start-up tests on a new reactor type: characteristics of vibratory modes during hot tests and at 30 % power.

6.2 Surveillance

Impression papier de toutes les signatures spectrales mono- et inter-voies et des résultats de tous les calculs réalisés par le logiciel (tel que défini en 4.4.2).

Toutes les impressions papier doivent être accompagnées d'une feuille spécifiant:

- le nom de l'opérateur;
- le nom du réacteur;
- le numéro de campagne combustible;
- la date;
- la concentration en bore;
- l'usure du combustible le plus récemment chargé;
- le type et l'enrichissement du combustible;
- la position exacte et la direction de mesure de l'instrumentation;
- la puissance nucléaire;
- la tension moyenne des chambres neutroniques, lue dans les armoires électriques de la tranche;
- les gammes de réglage des amplificateurs des capteurs de cuve;
- la phase dans la campagne combustible (JEPP);
- si c'est le début de la campagne combustible:
 - une liste de tous les capteurs remplacés pendant l'arrêt;
 - une description de toutes les réparations sur les internes pendant l'arrêt (changement d'anneau de calage, par exemple).

Bilan de la campagne combustible: synthèse du comportement des internes pendant la campagne combustible, sur la base d'une analyse de toutes les mesures.

6.3 Diagnostics

Rapport de diagnostic: Dans le cas où les critères sur l'amplitude, la fréquence ou les seuils d'alerte sont dépassés, si un changement anormal est détecté, s'il y a une non-conformité dans les règles sur la cohérence et la phase, ou s'il y a une allure de signature spectrale inhabituelle.

6.2 Monitoring

Print-outs of all mono- and cross-channel spectral signatures and of the results of all calculations performed by the software (as defined in 4.4.2).

All print-outs shall be accompanied by a data sheet specifying:

- the operator's name;
- the reactor name;
- the fuel cycle number;
- the date;
- the boron concentration;
- the burnup of the most recently loaded fuel;
- the type and enrichment of the fuel;
- the exact position and measurement orientation of the instrumentation;
- the nuclear power;
- the mean voltages of the neutron detectors, read in the instrumentation cabinets of the unit;
- the adjustment ranges of vessel sensor amplifiers;
- the phase in the fuel cycle (EFPD);
- if at the beginning of the fuel cycle:
 - a list of all sensors replaced during shutdown;
 - a description of all repairs on internals during shutdown (change of hold-down spring, for example).

Fuel cycle report: synthesis of the behaviour of internals during the fuel cycle, on the basis of an analysis of all readings.

6.3 Diagnosis

Diagnosis report: in the event that frequency or magnitude criteria or warning thresholds are exceeded, if an abnormal change is detected, if there is non-conformity of coherence and phase laws, or an unusual spectral signature shape.

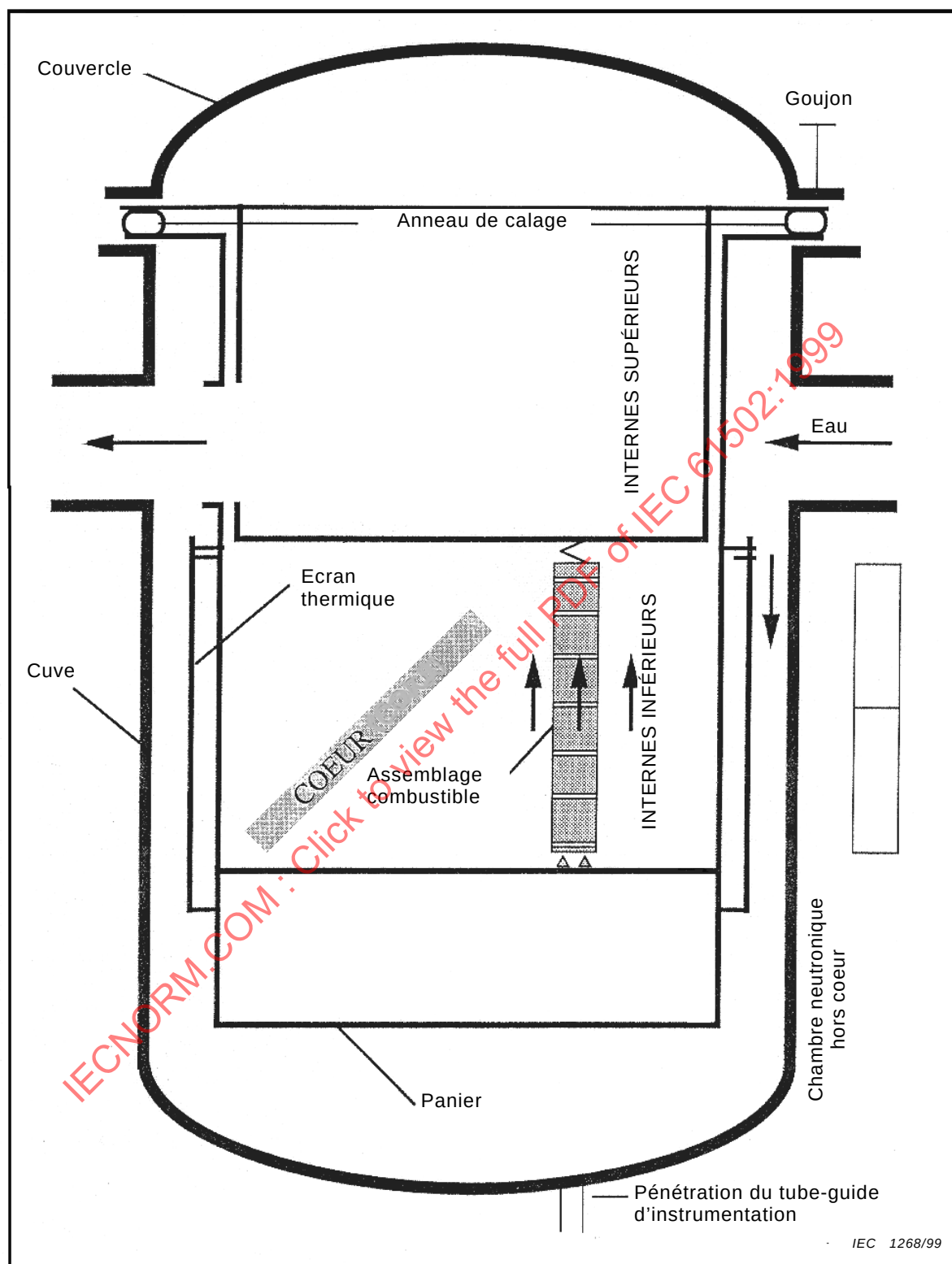


Figure 1 – Schéma des internes et de l'instrumentation

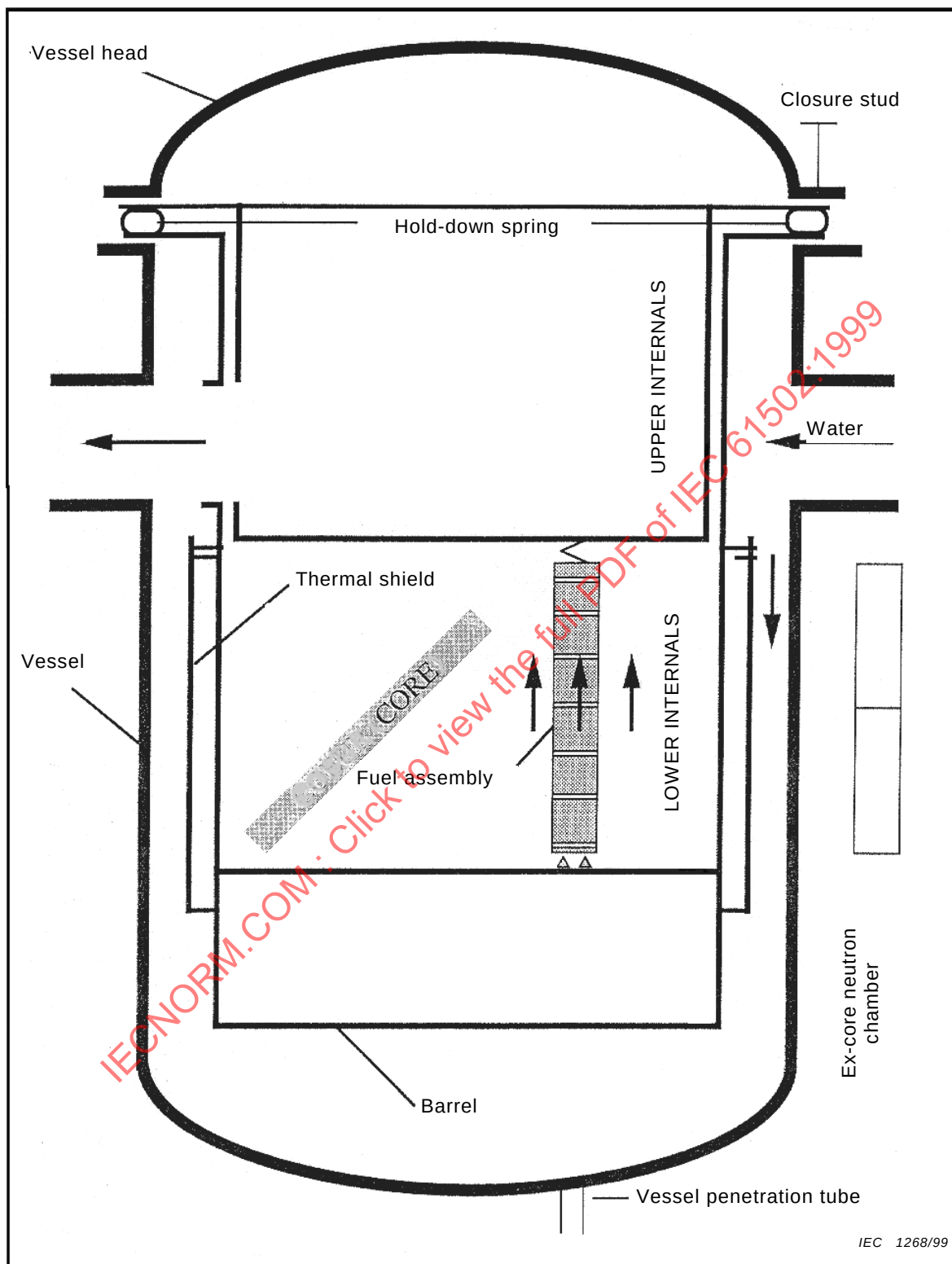


Figure 1 – Diagram of internals and instrumentation

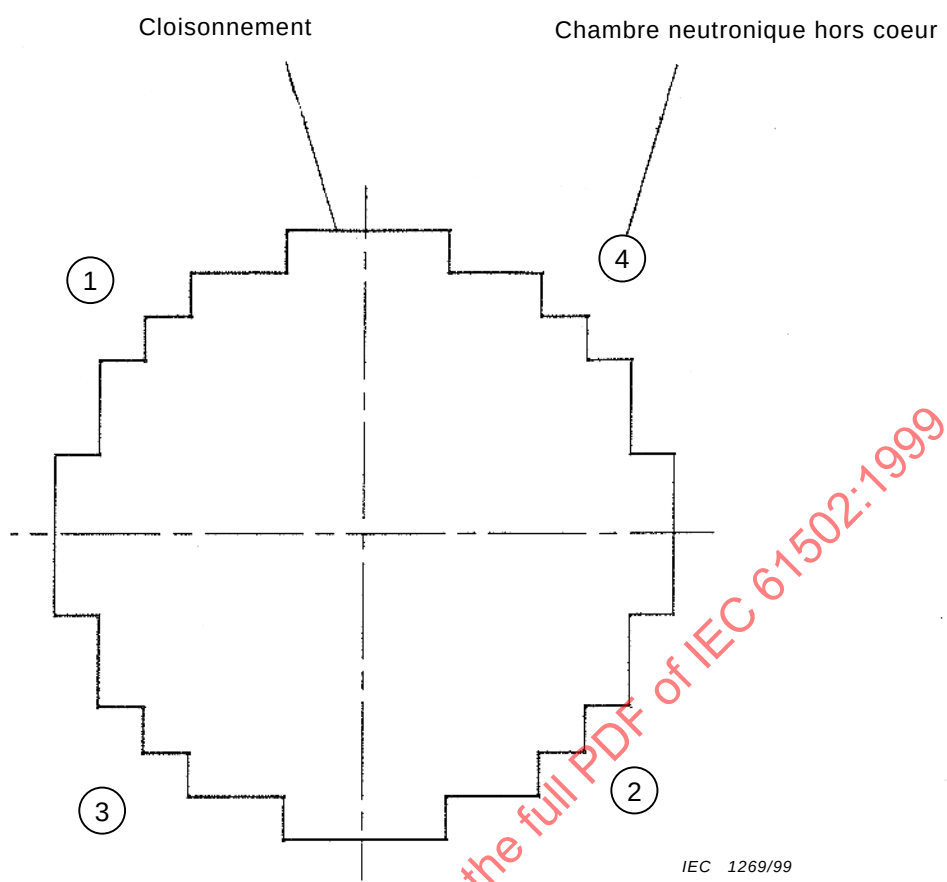


Figure 2 – Implantation des chambres neutroniques hors coeur

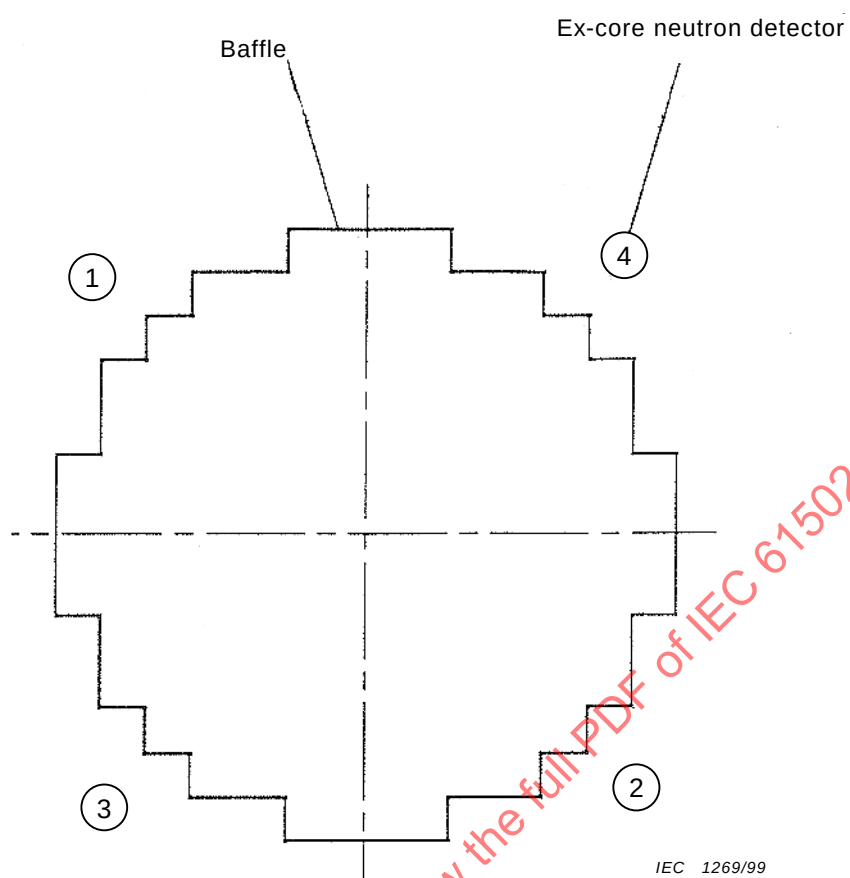
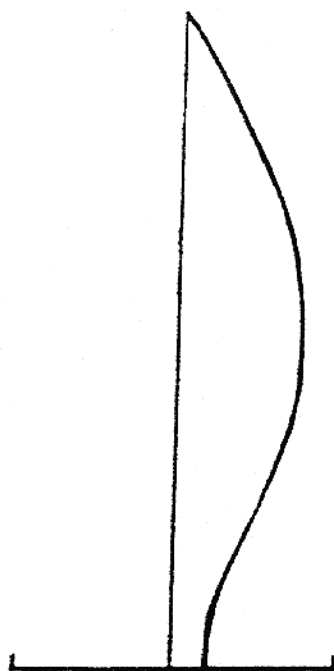
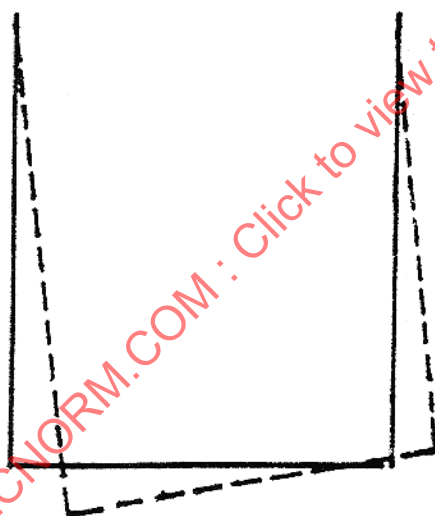


Figure 2 – Arrangement of ex-core neutron detectors



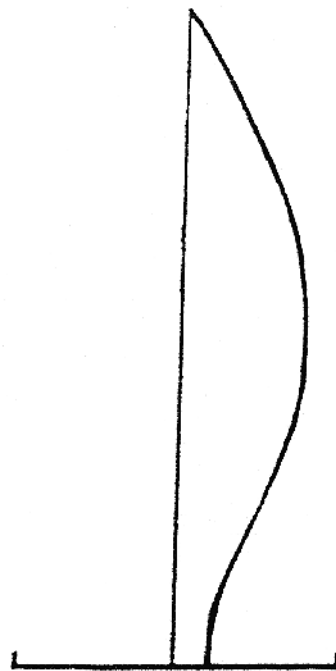
Assemblage combustible



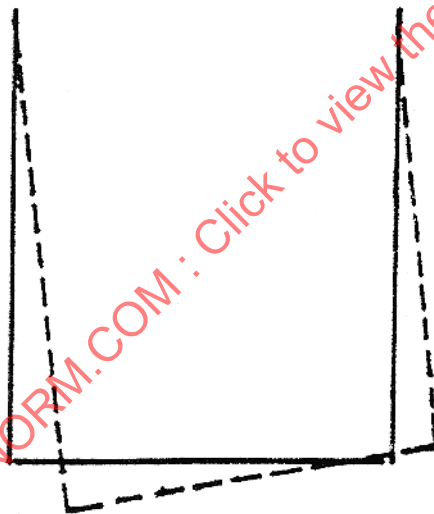
Panier de coeur

IEC 1270/99

Figure 3 – Déformées modales types sur les modes poutres d'assemblages et du panier



Fuel assembly



Core barrel

IEC 1270/99

Figure 3 – Typical modal shapes on beam modes of fuel assemblies and core barrel

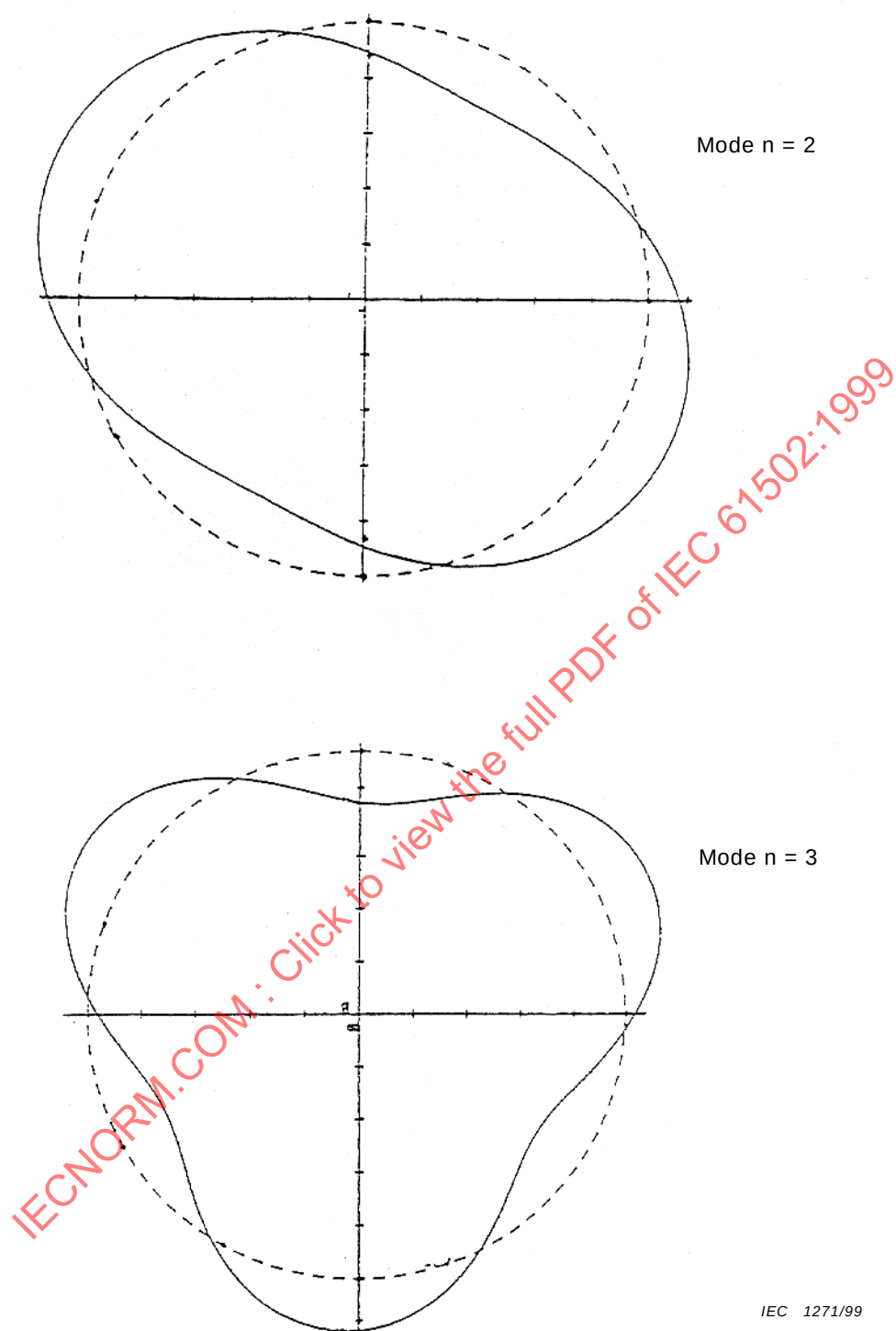
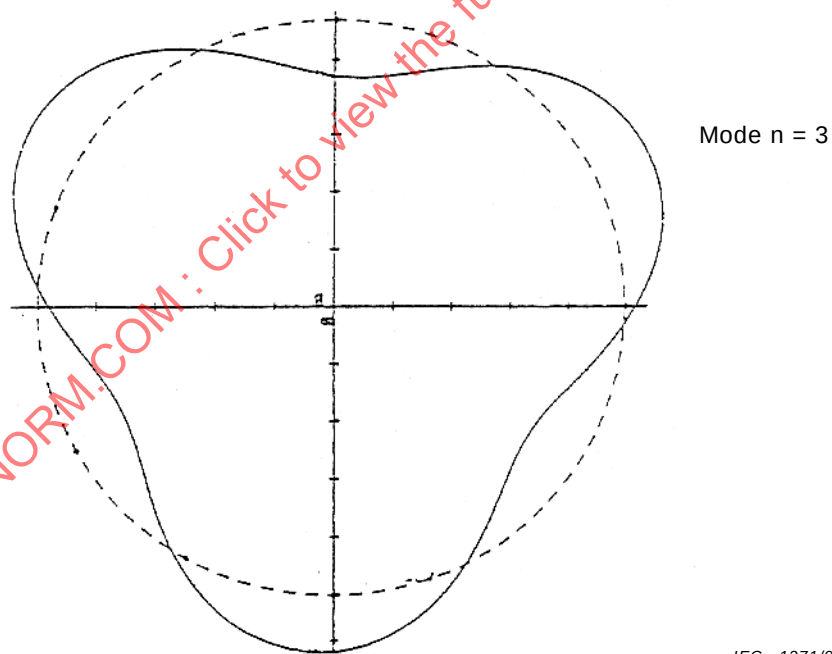
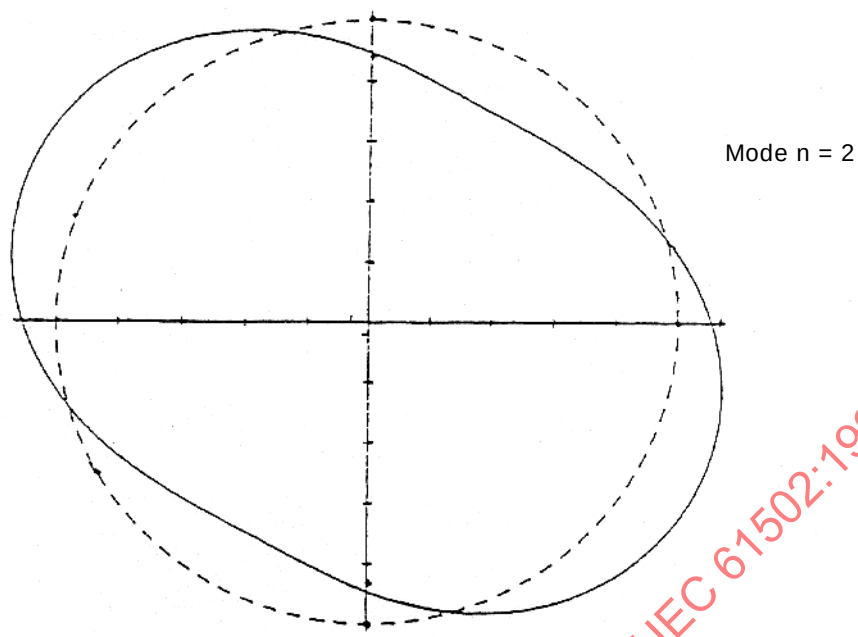


Figure 4 – Déformées modales types sur les modes coques d'un écran thermique cylindrique



IEC 1271/99

Figure 4 – Typical modal shapes on the shell modes of a cylindrical thermal shield

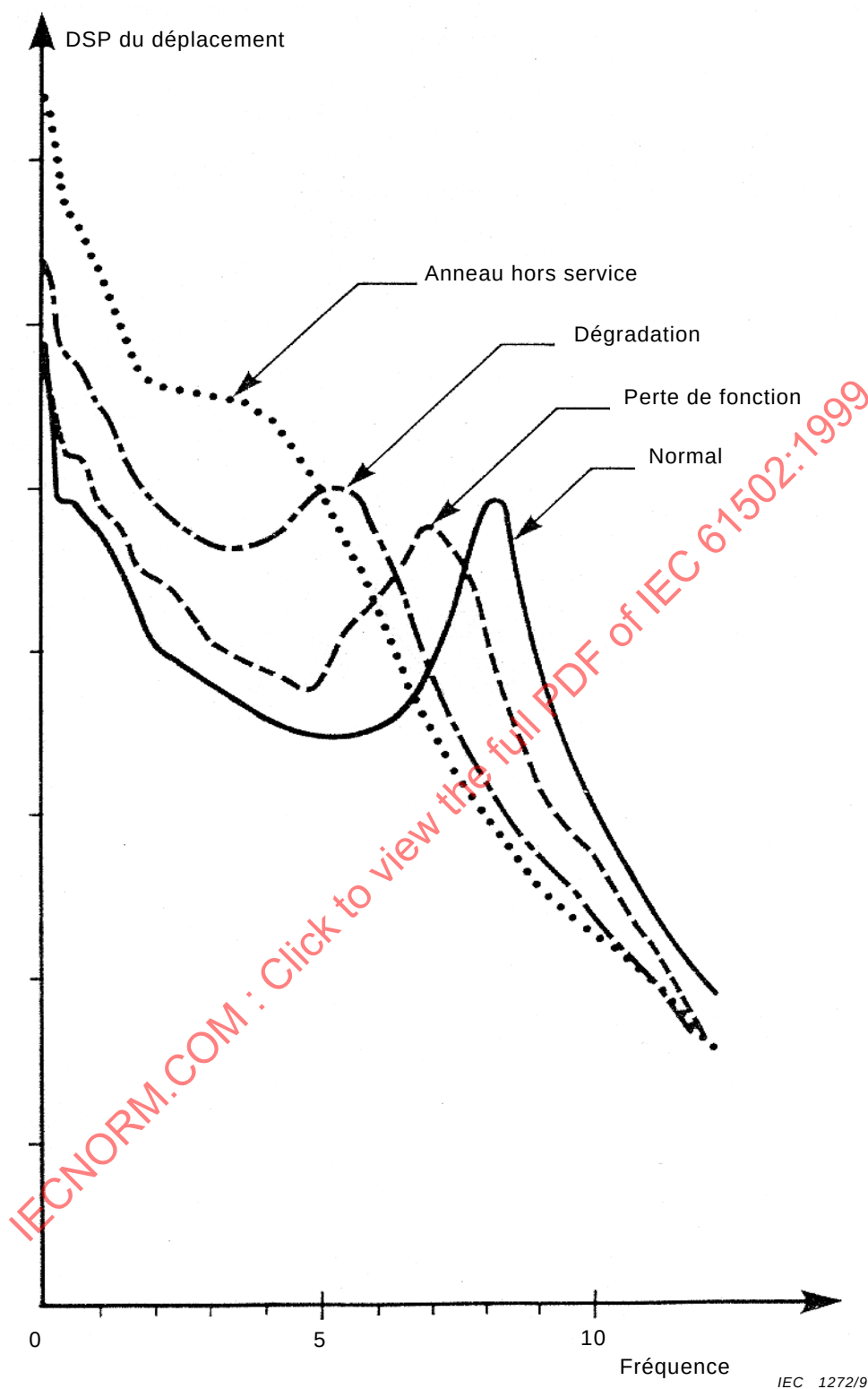


Figure 5 – Exemple d'évolution des signatures vibratoires du panier de coeur lors d'une dégradation de l'anneau de calage (résultats obtenus sur maquette)

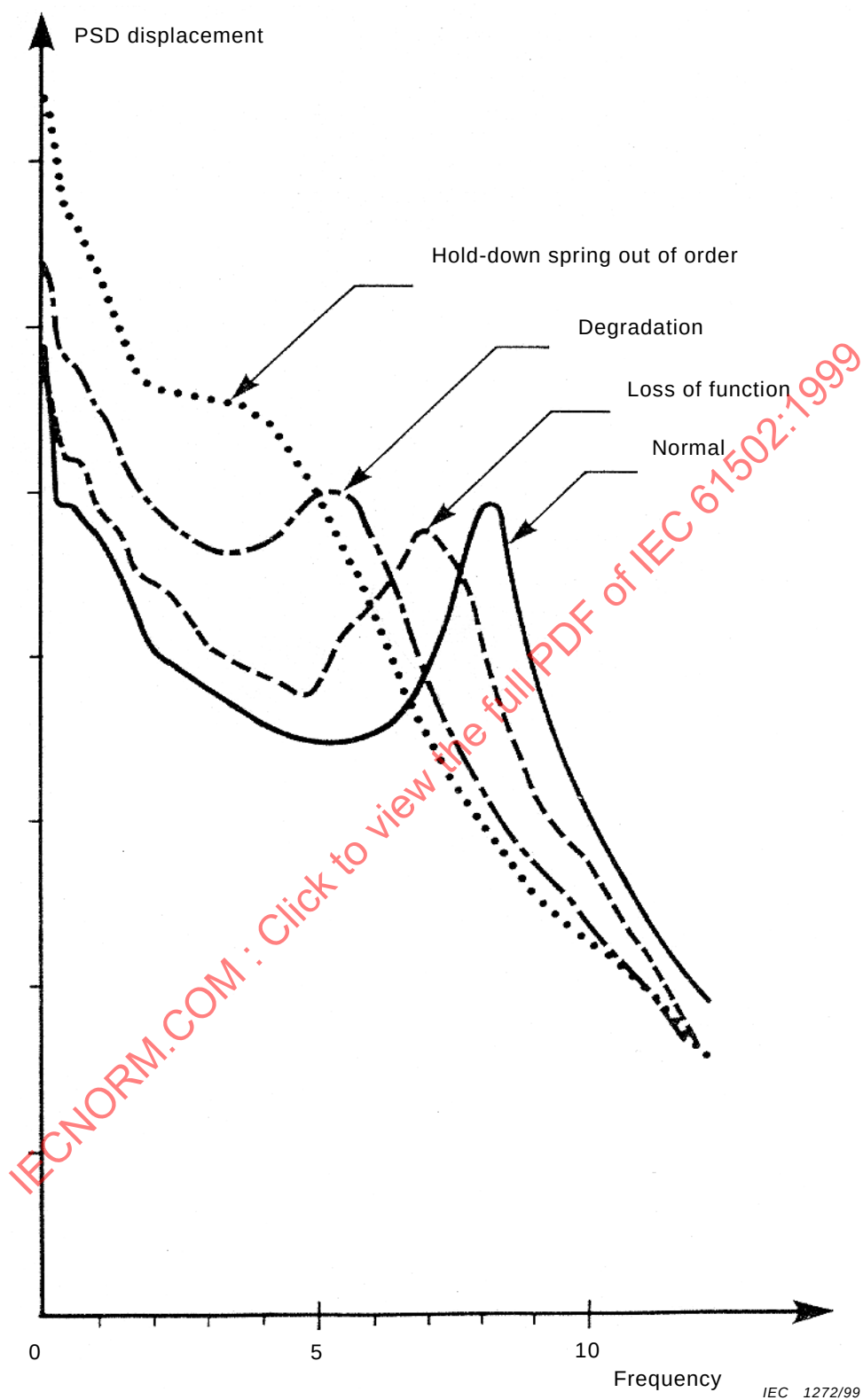


Figure 5 – Example of change in core barrel vibratory signatures in the case of degradation of the hold-down spring (results obtained on a mock-up)

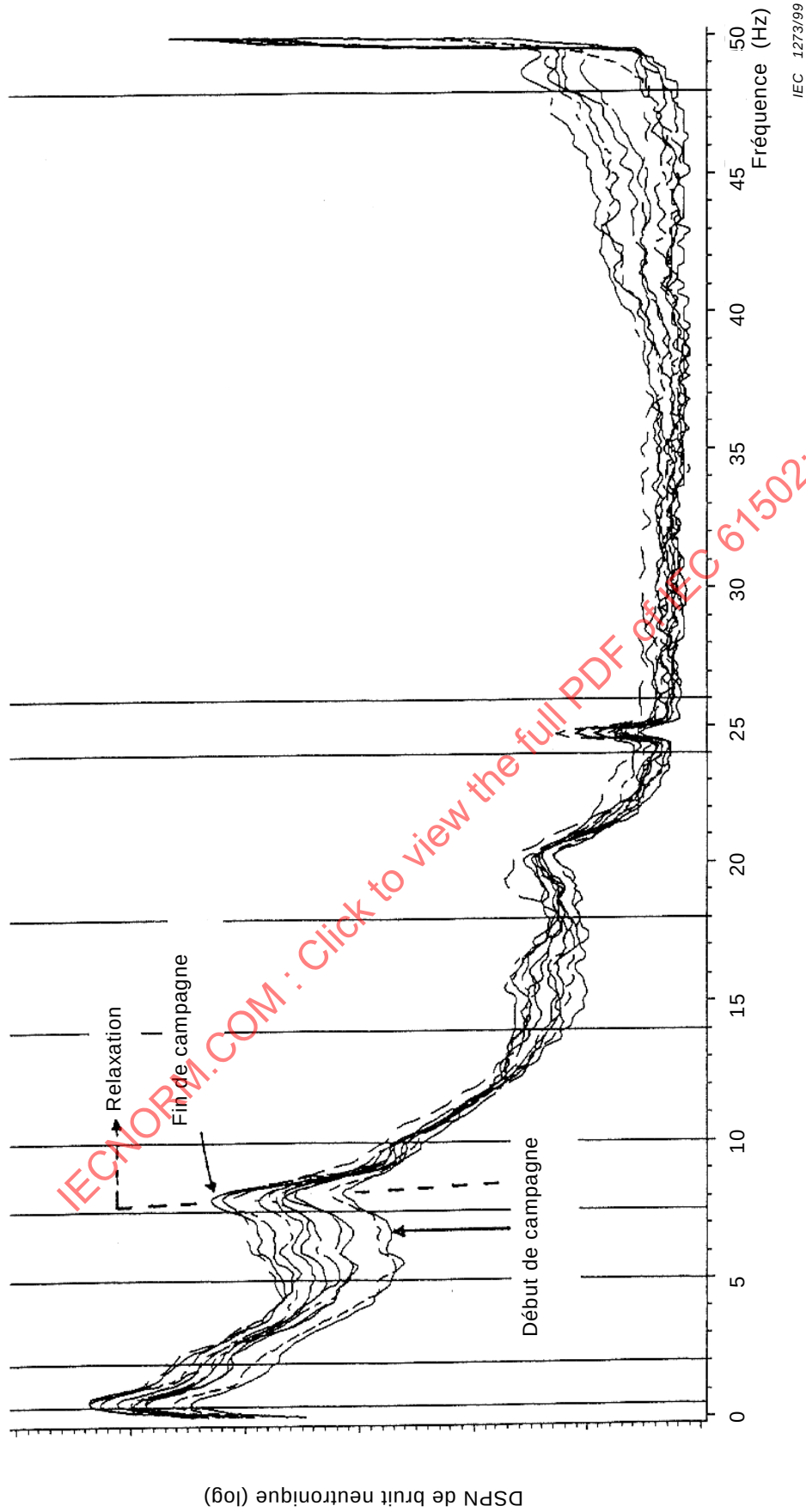


Figure 6 – Exemple d'évolution des signatures du bruit neutronique hors coeur consécutive à une très légère relaxation d'anneau de calage (résultats obtenus sur réacteur)

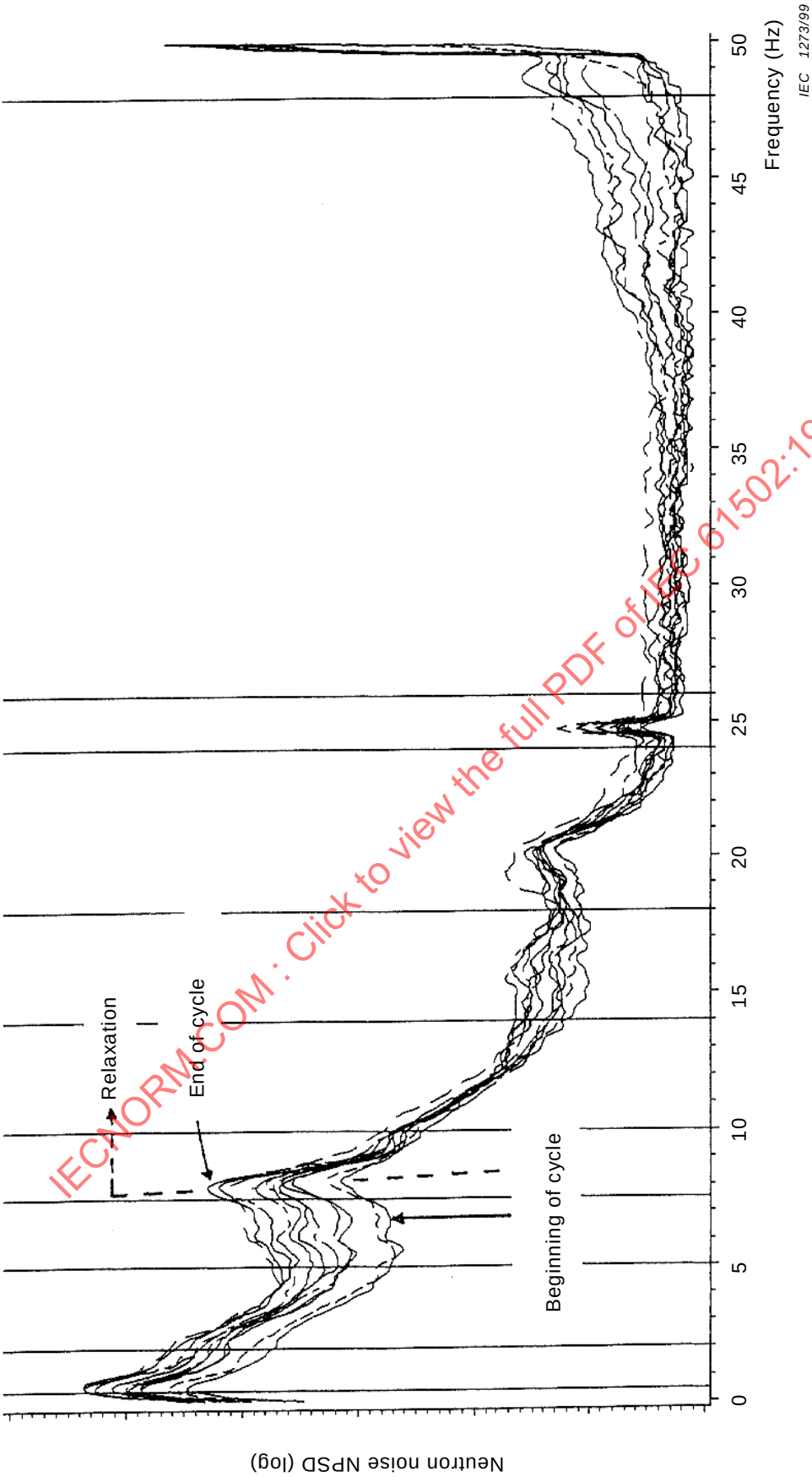
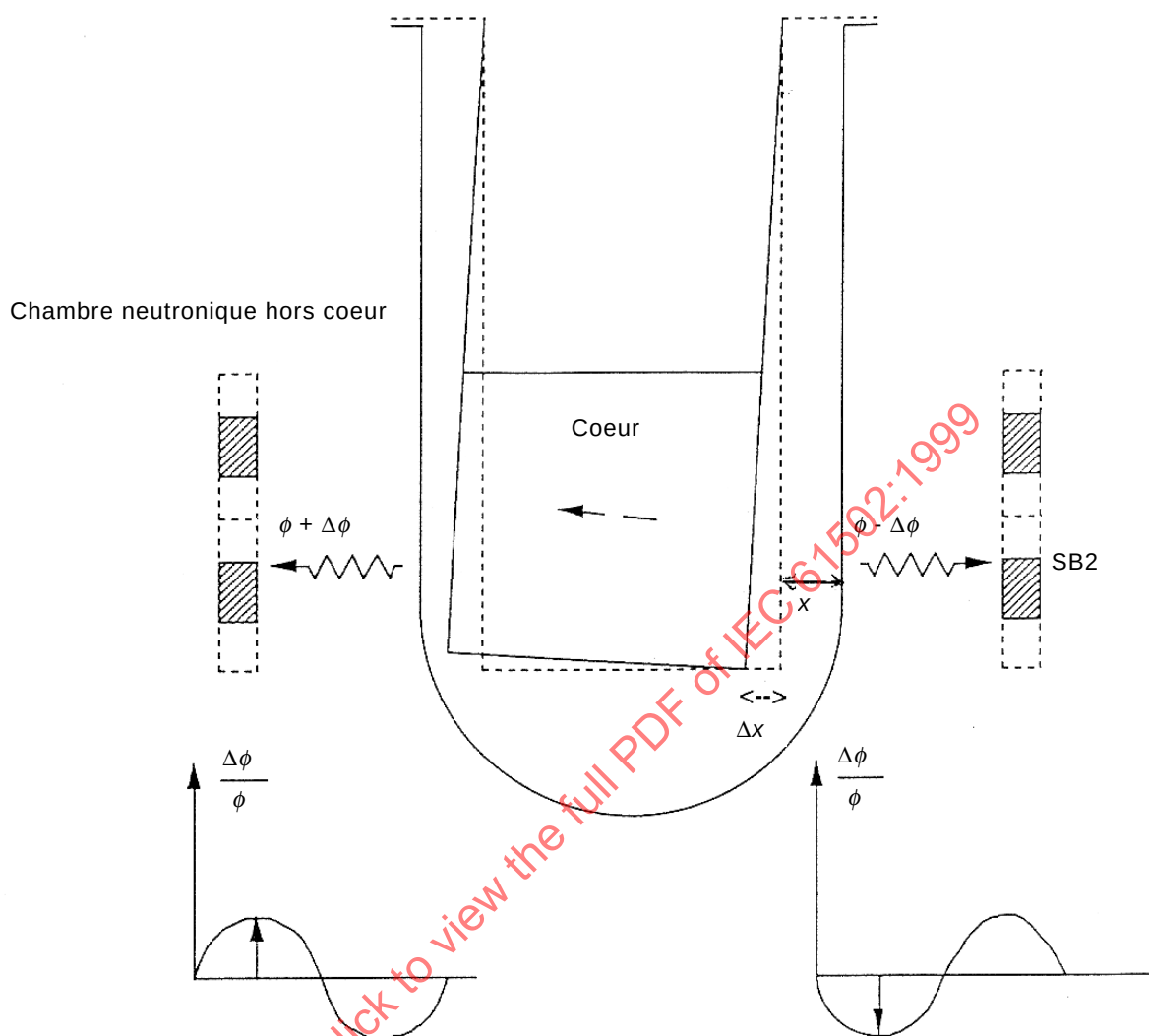


Figure 6 – Example of change in ex-core neutron noise signatures following a very slight relaxation of the hold-down spring (results obtained on a reactor)



Opposition de phase entre chambres diamétralement opposées

IEC 1274/99

Figure 7 – Principe de détection du balancement du panier de coeur par le bruit neutronique hors coeur

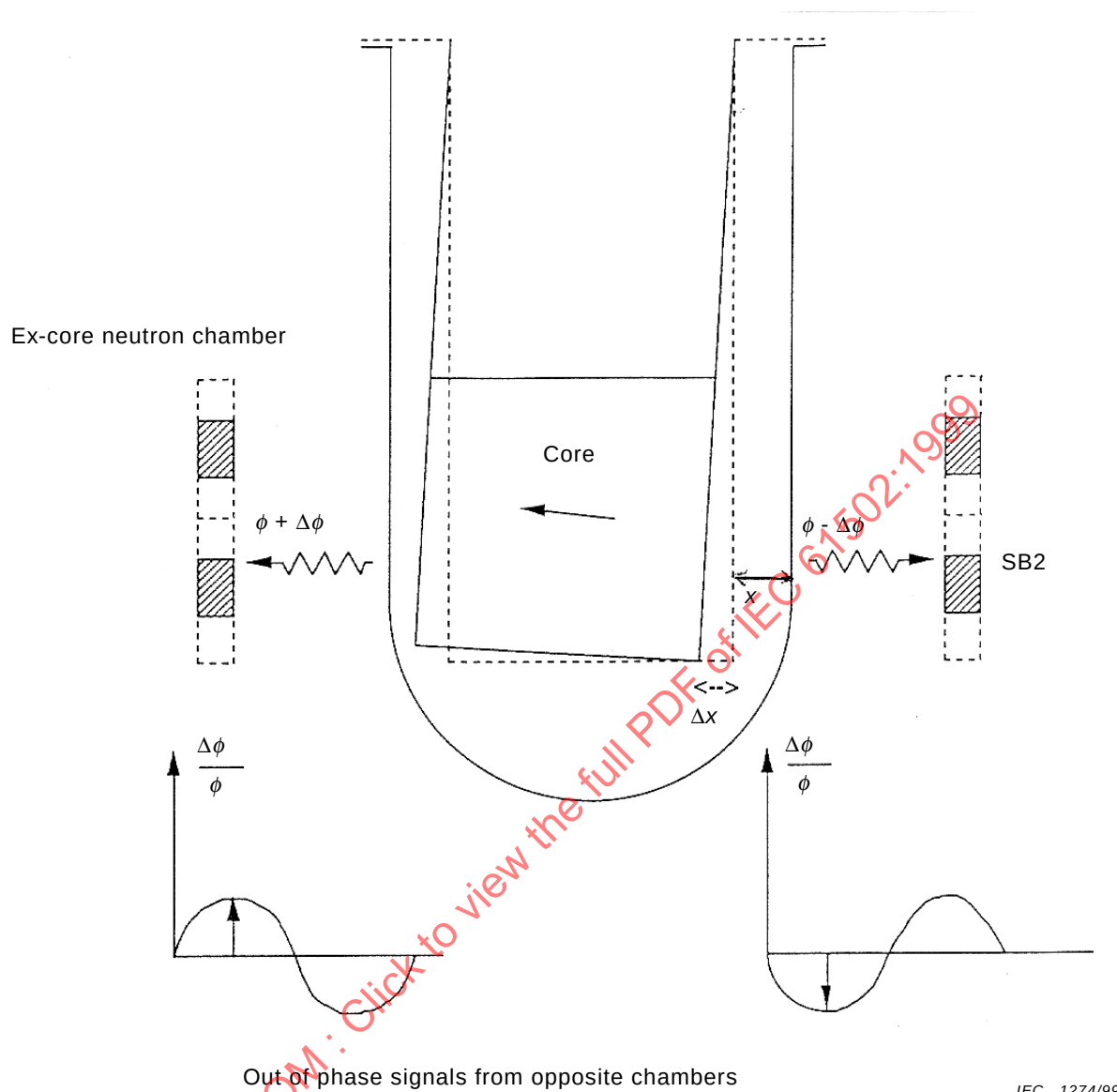
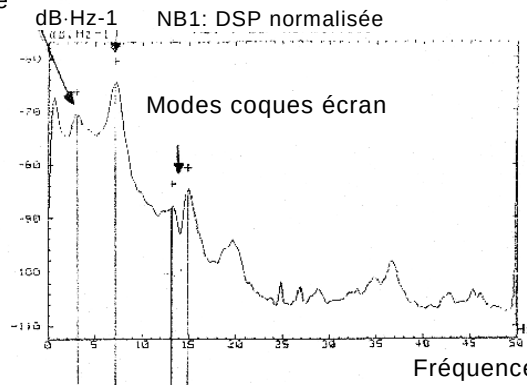


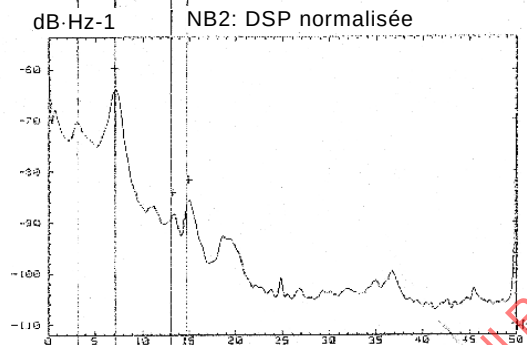
Figure 7 – Principle of detection of core barrel pendular motion using ex-core neutron noise

Mode poutre
assemblage

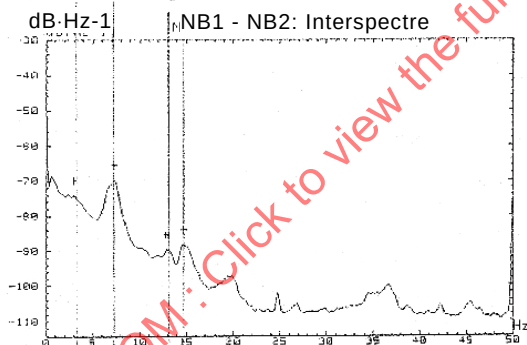
Mode poutre panier



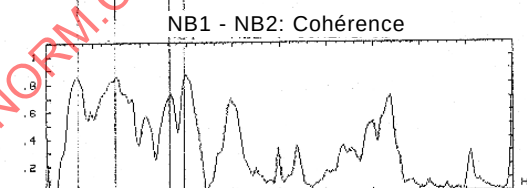
DSPN de bruit neutronique



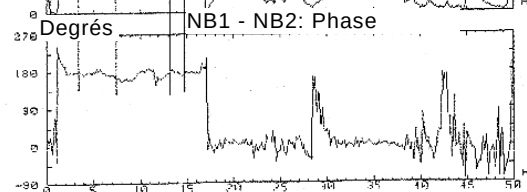
DSPN de bruit neutronique issu
de la chambre diamétralement opposée



DSPN entre bruits neutroniques issus
des chambres diamétralement opposées



Cohérence et phase entre bruits
neutroniques issus des chambres
diamétralement opposées

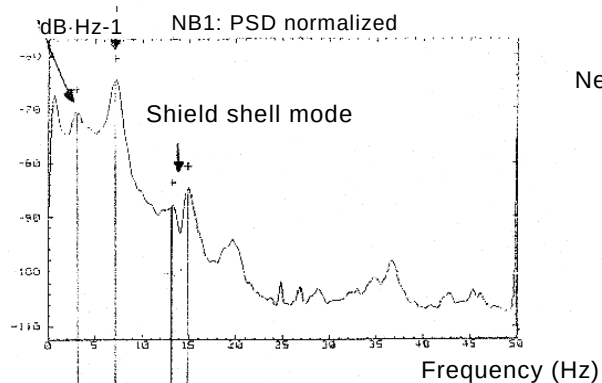


IEC 1275/99

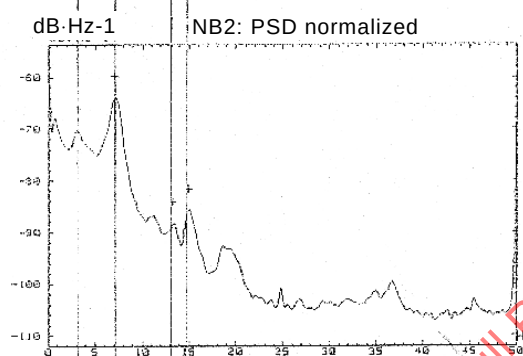
Figure 8 – Exemple de détection de modes vibratoires d'internes
sur les signatures de bruit neutronique hors coeur

Assembly beam
mode

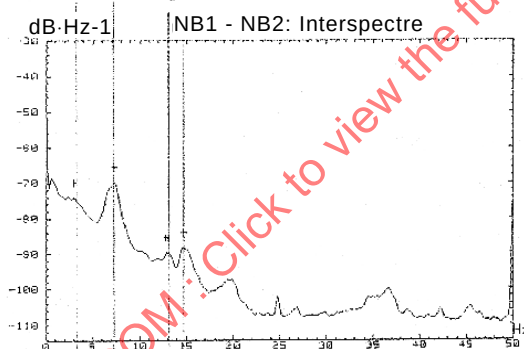
Barrel beam mode



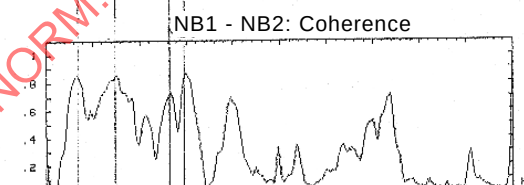
Neutron noise NPSP



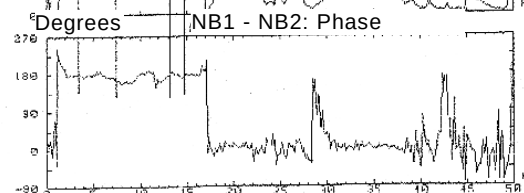
Neutron noise NPSP issued from the
opposite chamber



CPSD between neutron noise issued
from the opposite chambers



Coherence and phase between neutron
noise issued from the opposite chambers



IEC 1275/99

**Figure 8 – Example of detection of internals vibratory modes
on ex-core neutron noise signatures**

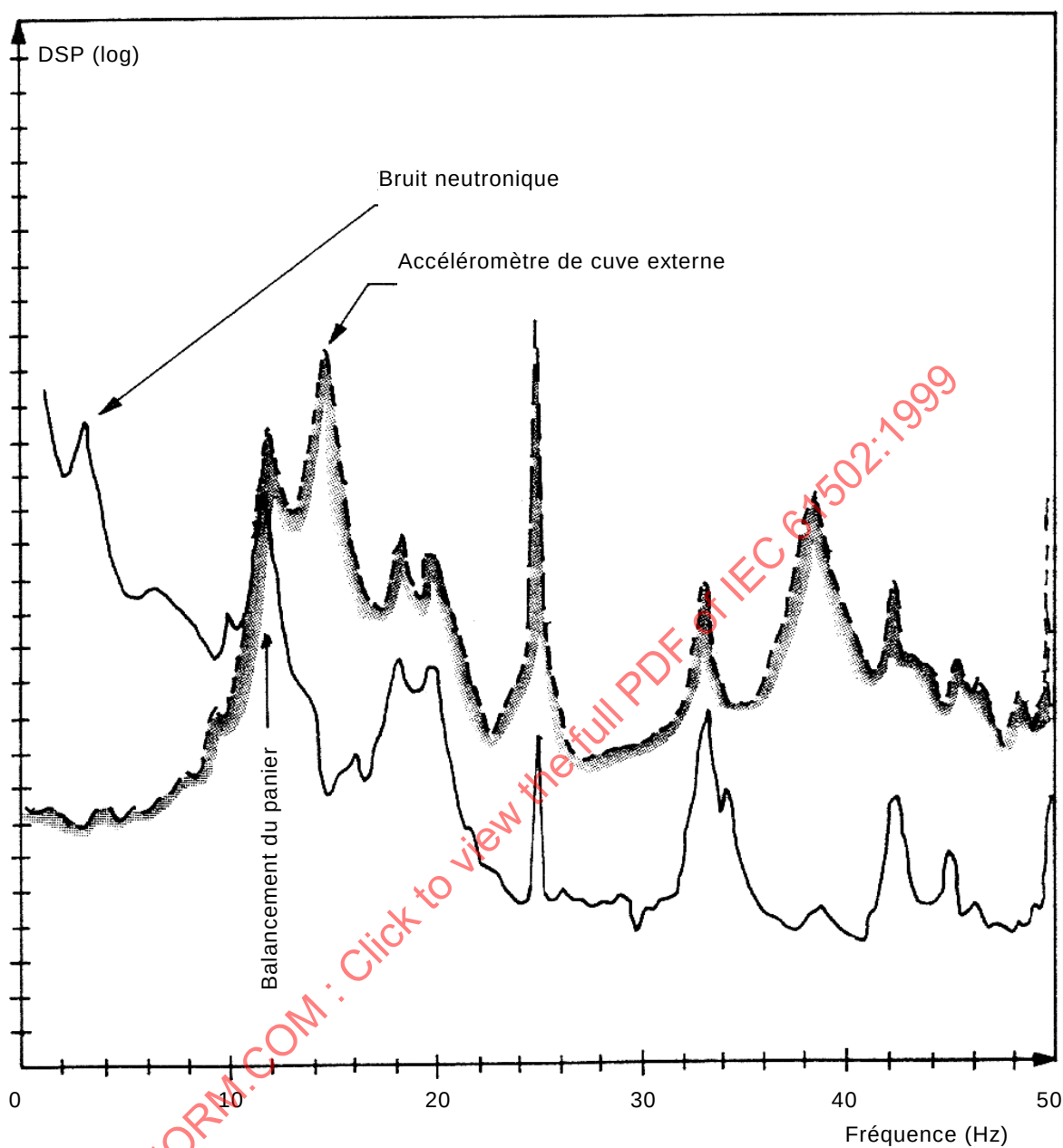
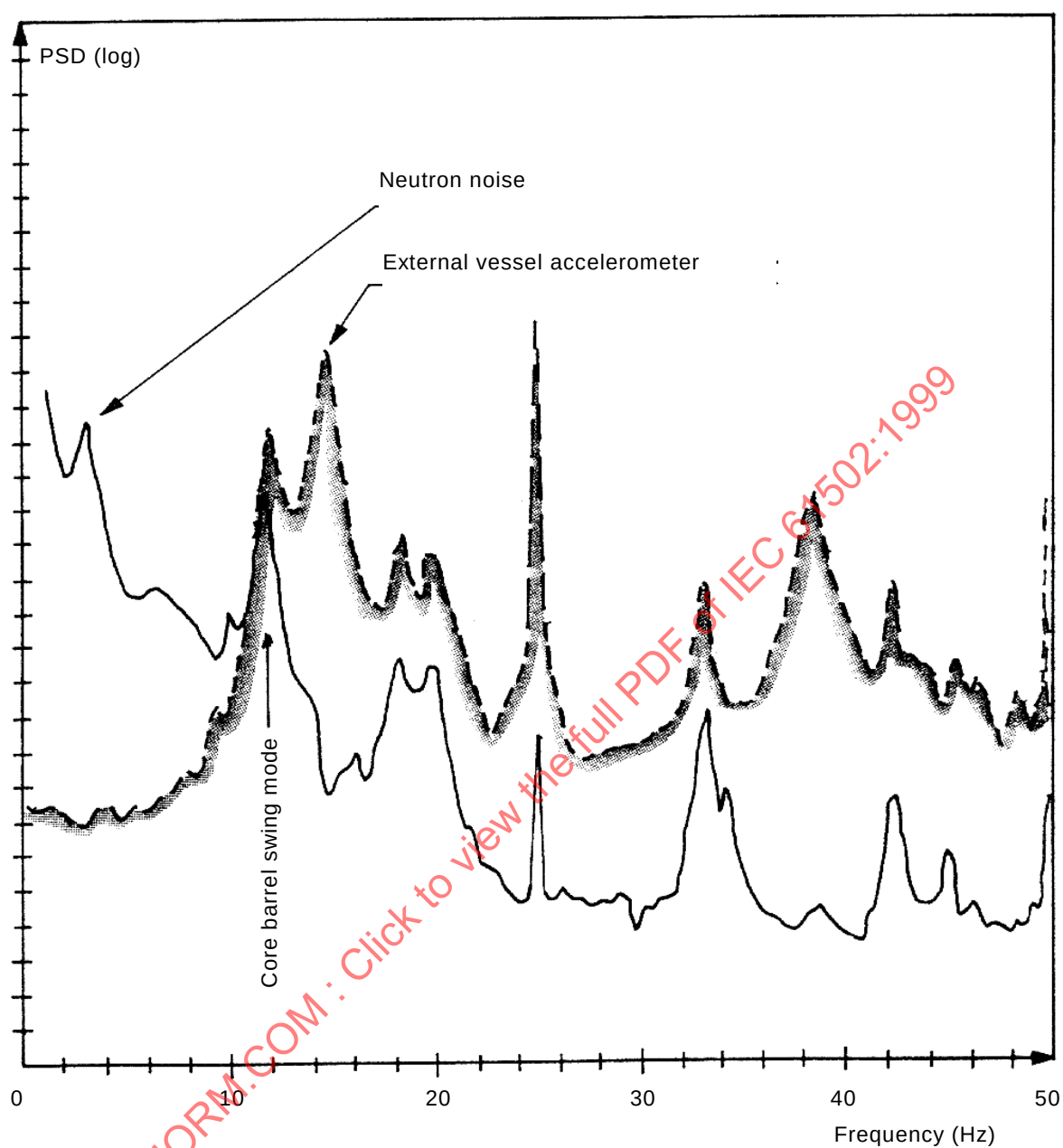
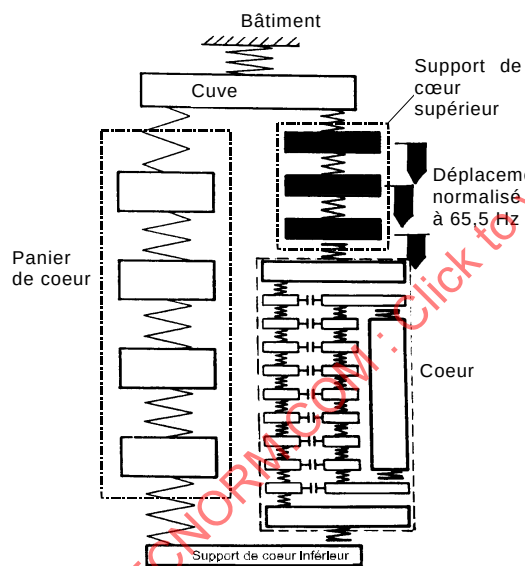
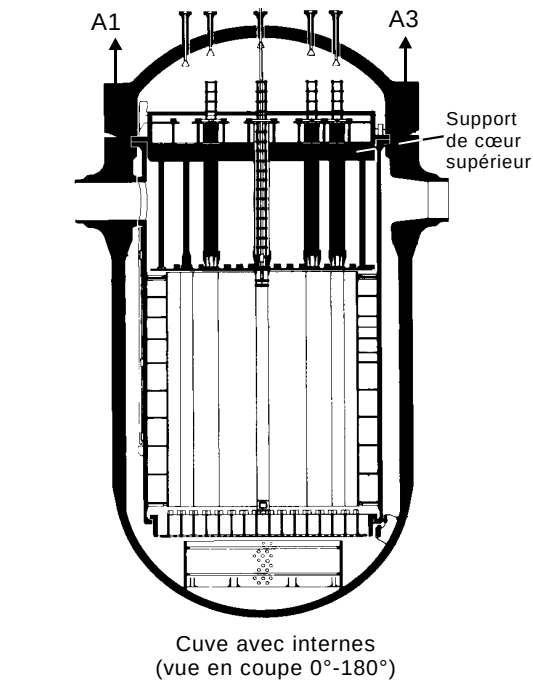


Figure 9 – Exemple de détection du balancement des internes par un capteur de vibration extérieur à la cuve

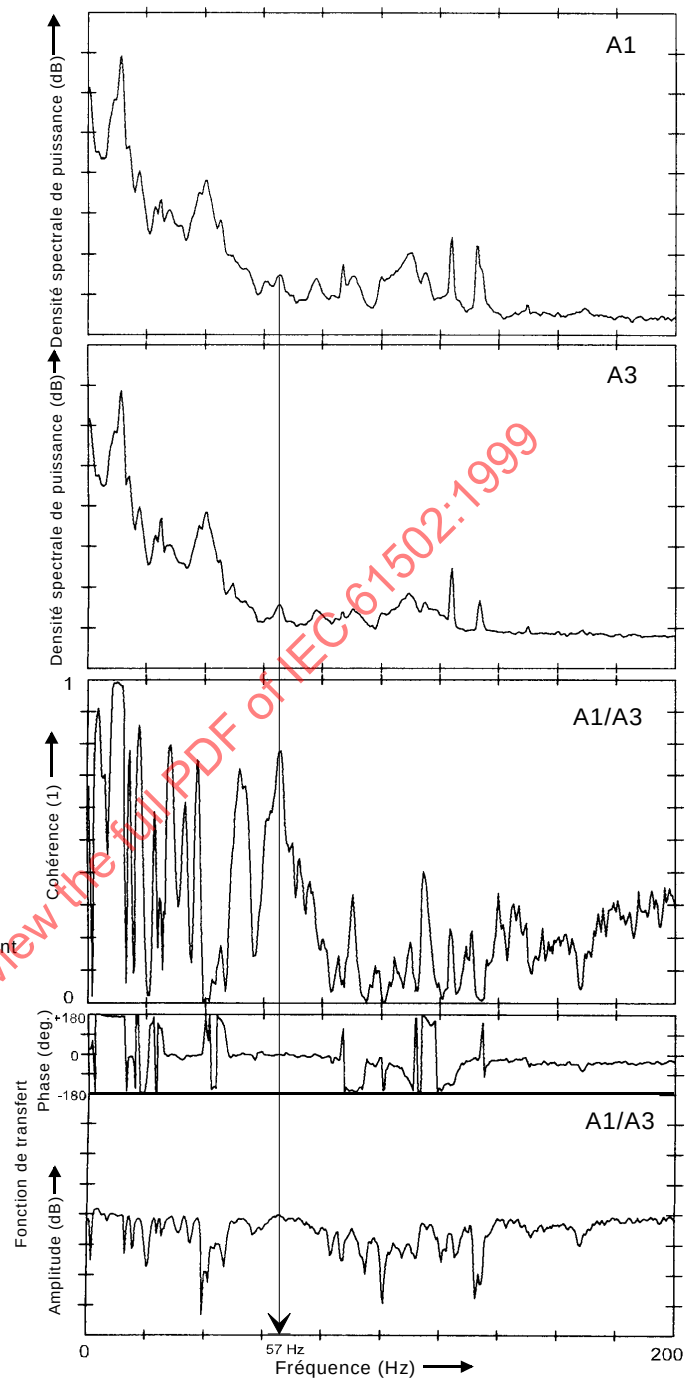


IEC 1276/99

**Figure 9 – Example of detection of swinging of internals
using a vibration sensor outside the vessel**



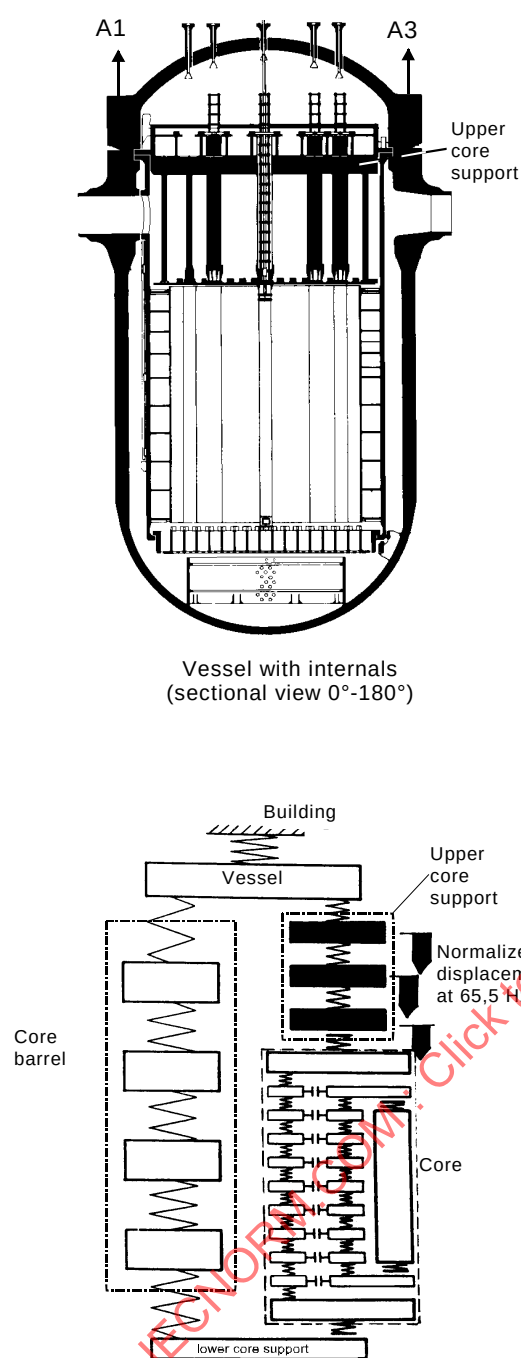
Modèle de la structure verticale de la cuve et des internes et résultat du calcul d'analyse modale: déformée vibratoire verticale et fréquence calculées à $f = 65,5$ Hz du support de cœur supérieur



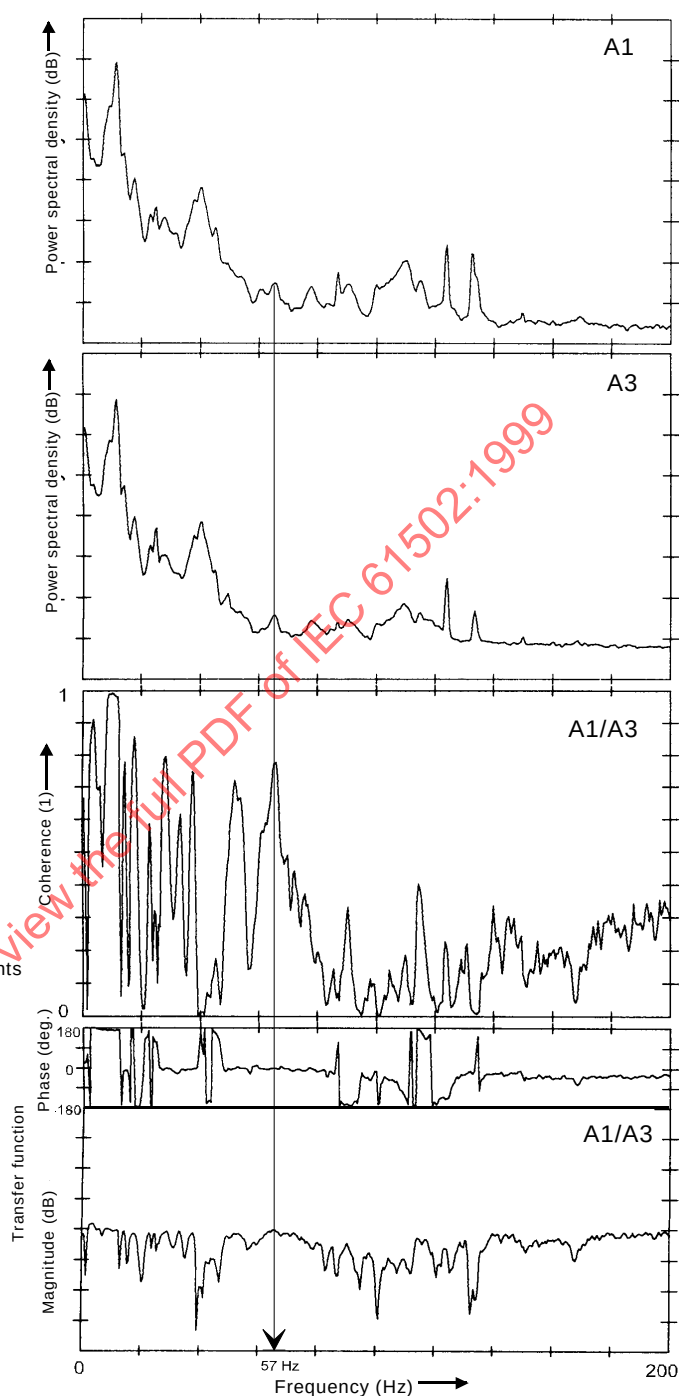
Analyse de corrélation des mesures de vibrations verticales absolues de la cuve: fréquence de la déformée vibratoire verticale du support de cœur supérieur $f = 57$ Hz

IEC 1277/99

Figure 10 – Surveillance du support de cœur supérieur par les vibrations verticales absolues de la cuve (cohérence A1/A3)



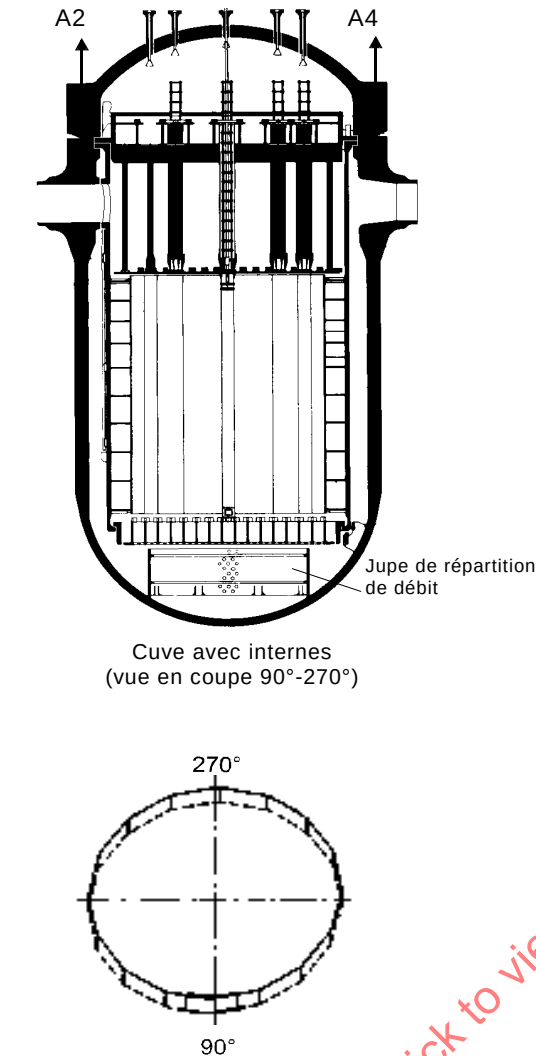
Structural vertical model of RPV and internals and result of the computational modal analysis: calculated vertical vibration form and frequency $f = 65,5$ Hz of the upper core support



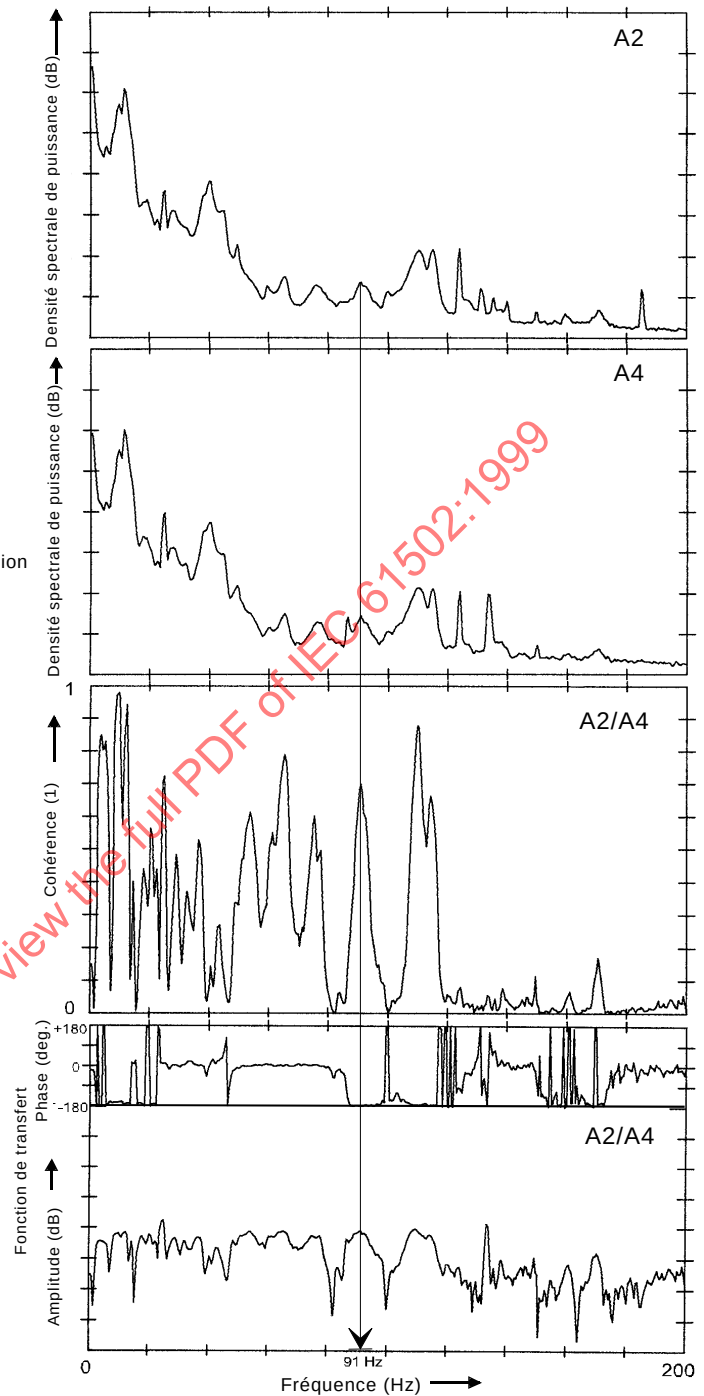
Correlation analysis of measured vertical absolute vessel vibrations: measured frequency of upper core support vertical vibration form $f = 57$ Hz

IEC 1277/99

Figure 10 – Monitoring of the upper core support by vertical absolute vessel vibrations (coherence A1/A3)



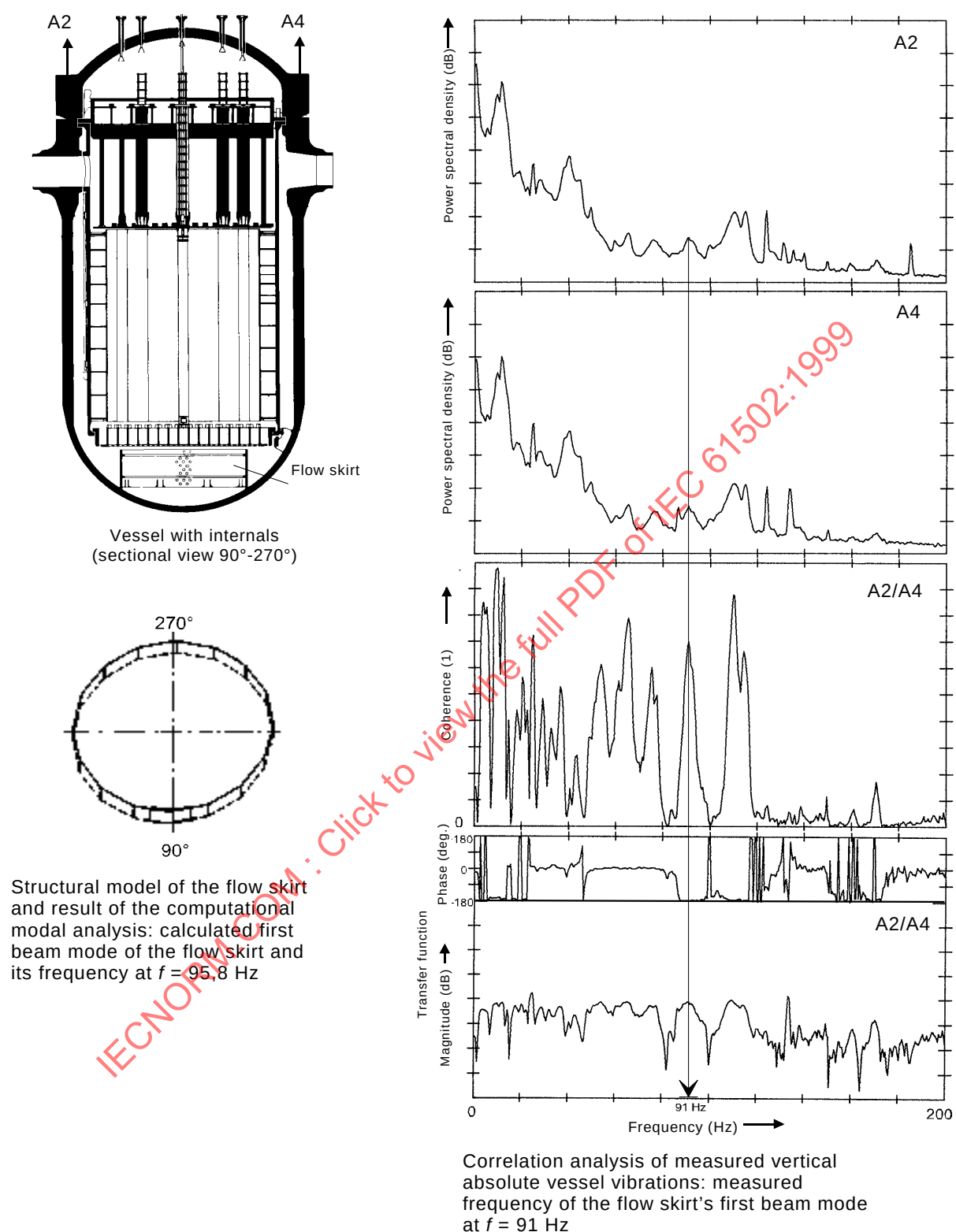
Modèle de la structure de la jupe de répartition de débit et résultat du calcul d'analyse modale: premier mode poutre calculé de la jupe de répartition de débit et sa fréquence à $f = 95,8$ Hz



Analyse de corrélation des mesures de vibrations verticales absolues de la cuve: fréquence mesurée du premier mode poutre de la jupe de répartition de débit à $f = 91$ Hz

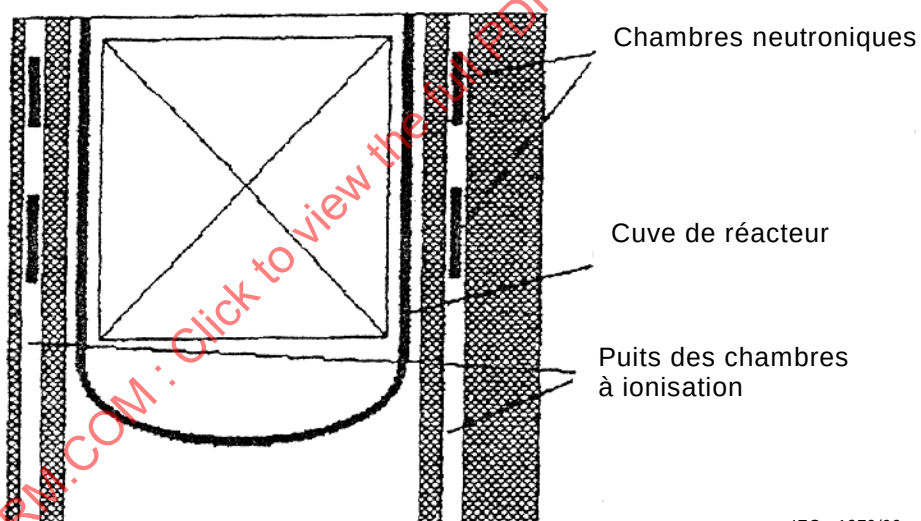
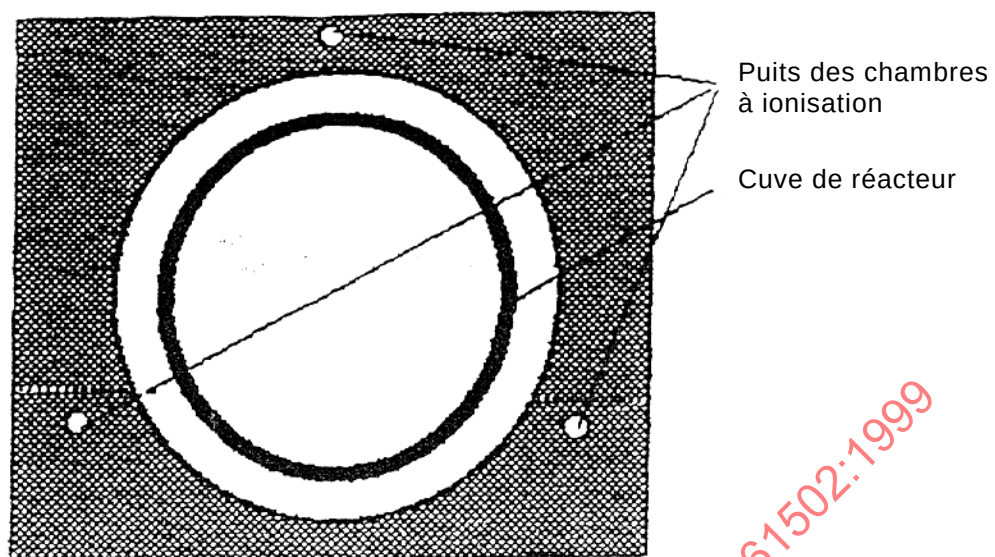
IEC 1278/99

Figure 11 – Surveillance de la vibration horizontale de la jupe de répartition de débit (1^{er} mode poutre) par les vibrations verticales absolues de la cuve (cohérence A2/A4)



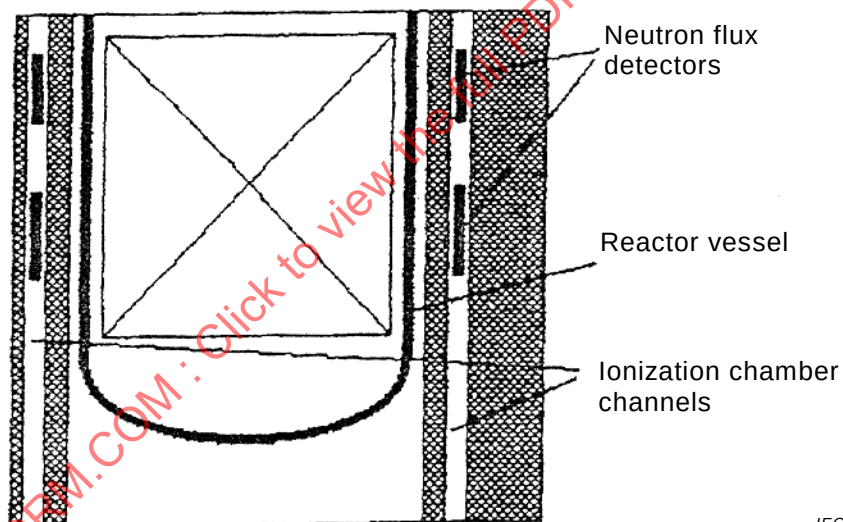
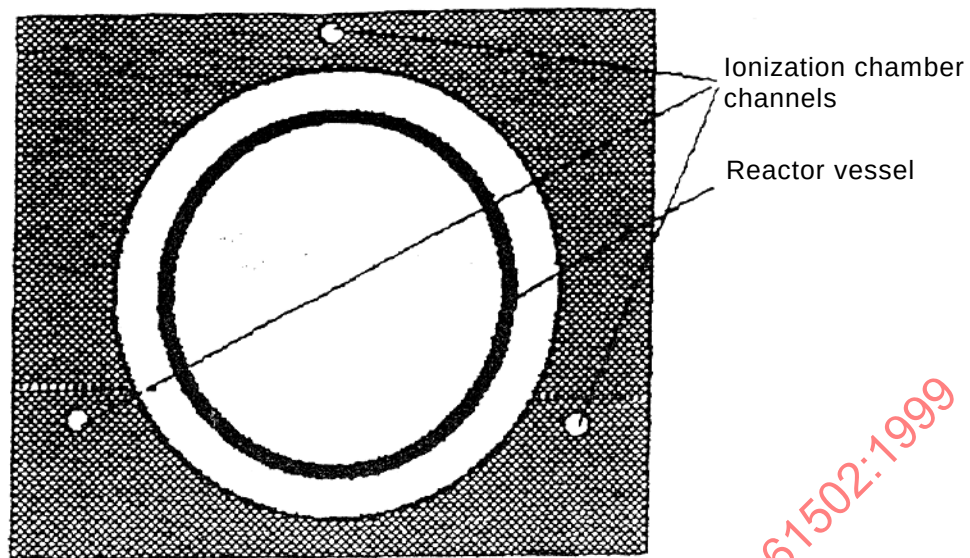
IEC 1278/99

Figure 11 – Monitoring of the horizontal flow skirt vibration (1st beam mode) by vertical absolute vessel vibrations (coherence A2/A4)



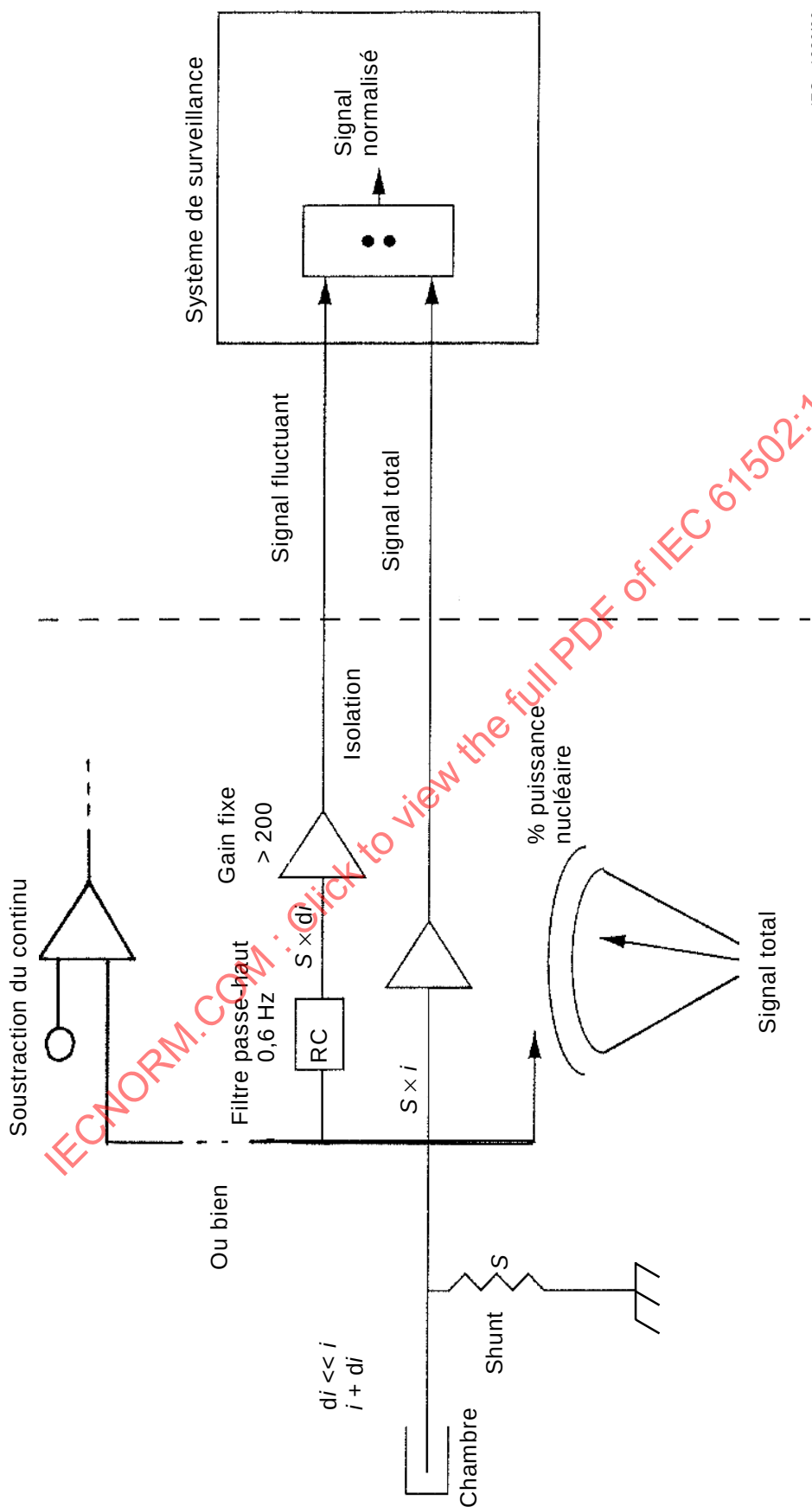
IEC 1279/99

Figure 12 – Localisation des détecteurs neutroniques hors cœur sur les réacteurs de type VVER



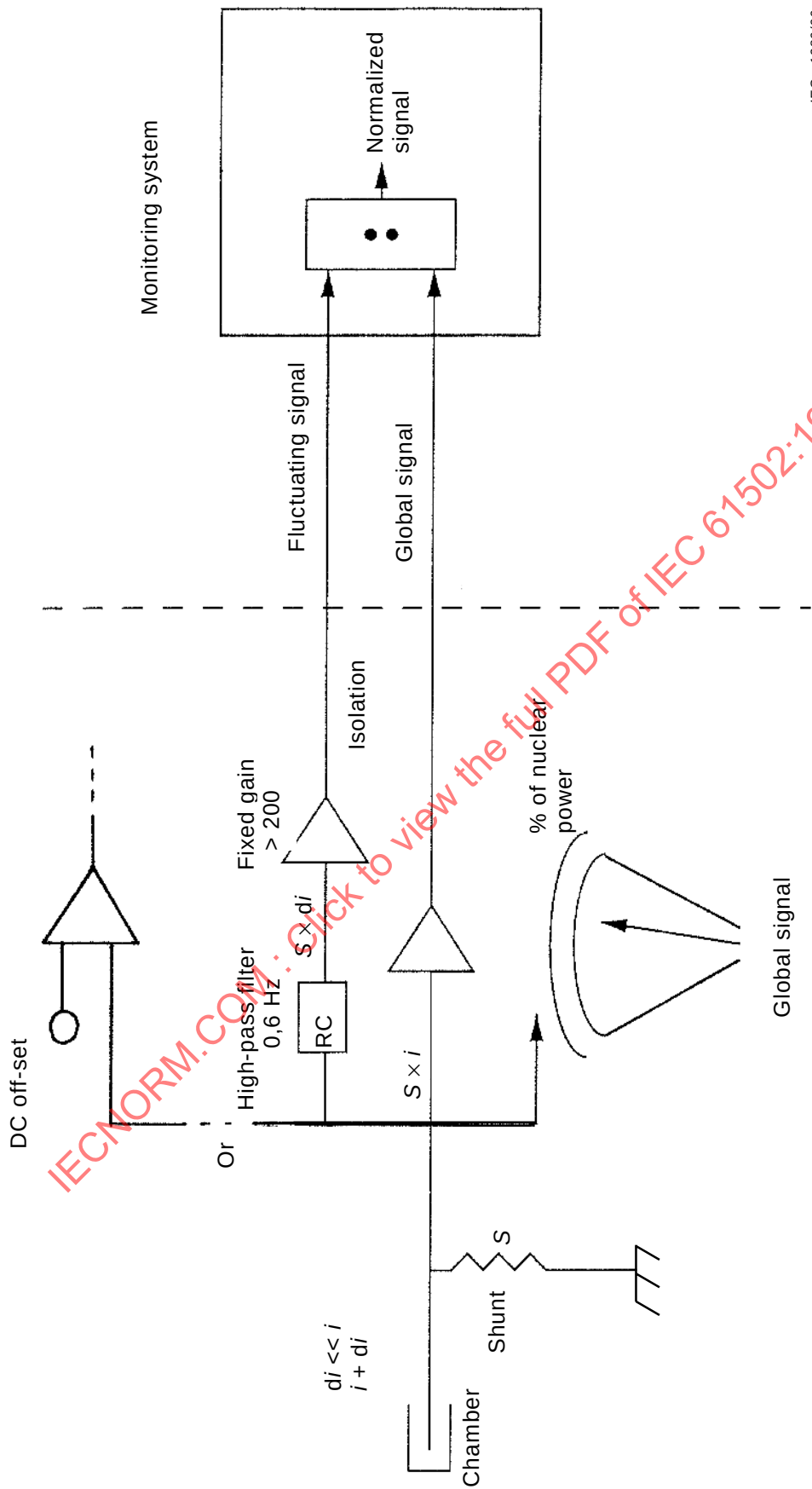
IEC 1279/99

Figure 12 – Location of ex-core neutron detectors on VVER-type reactors



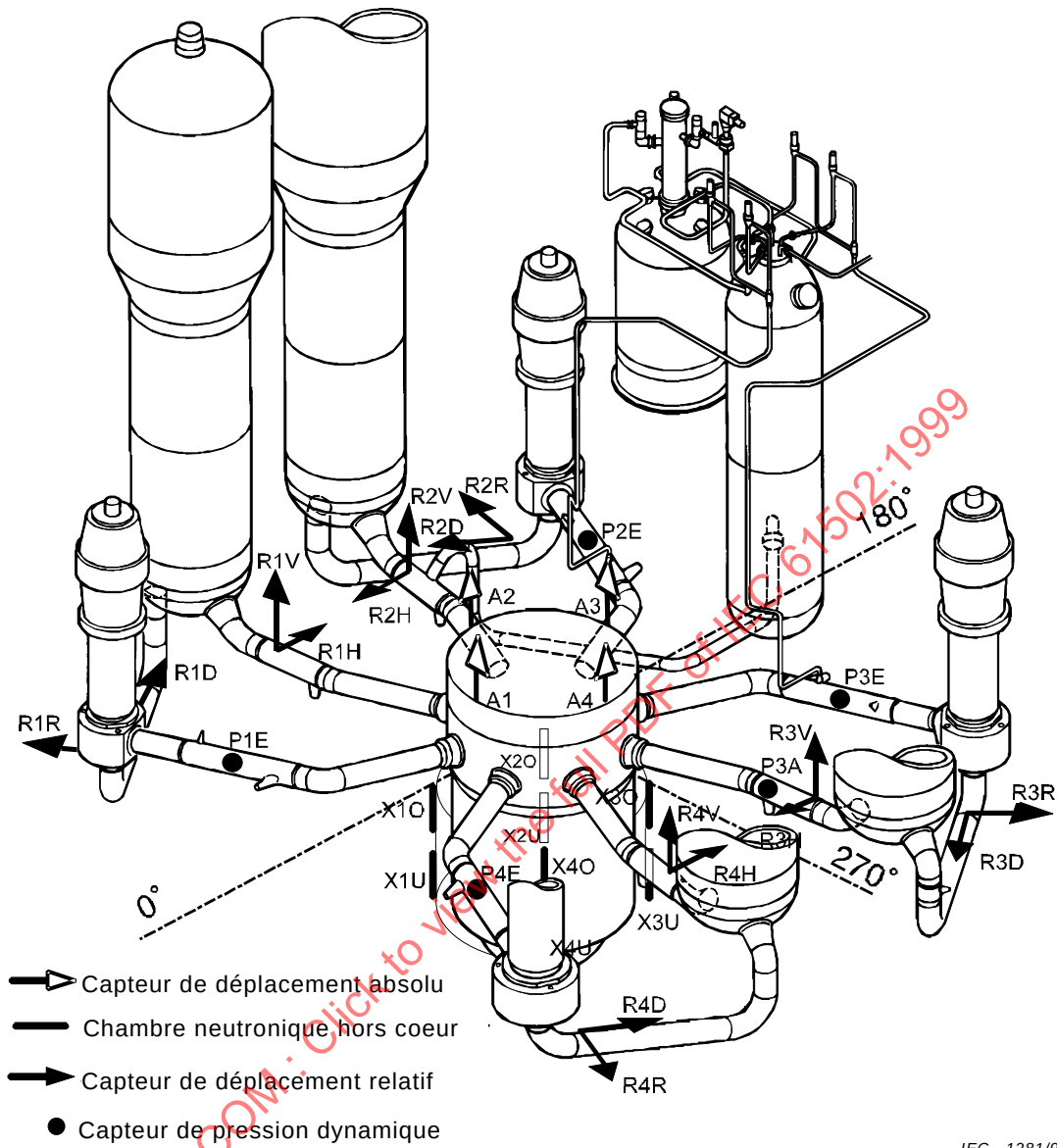
IEC 1280/99

Figure 13 – Exemple de prélèvement du bruit neutronique



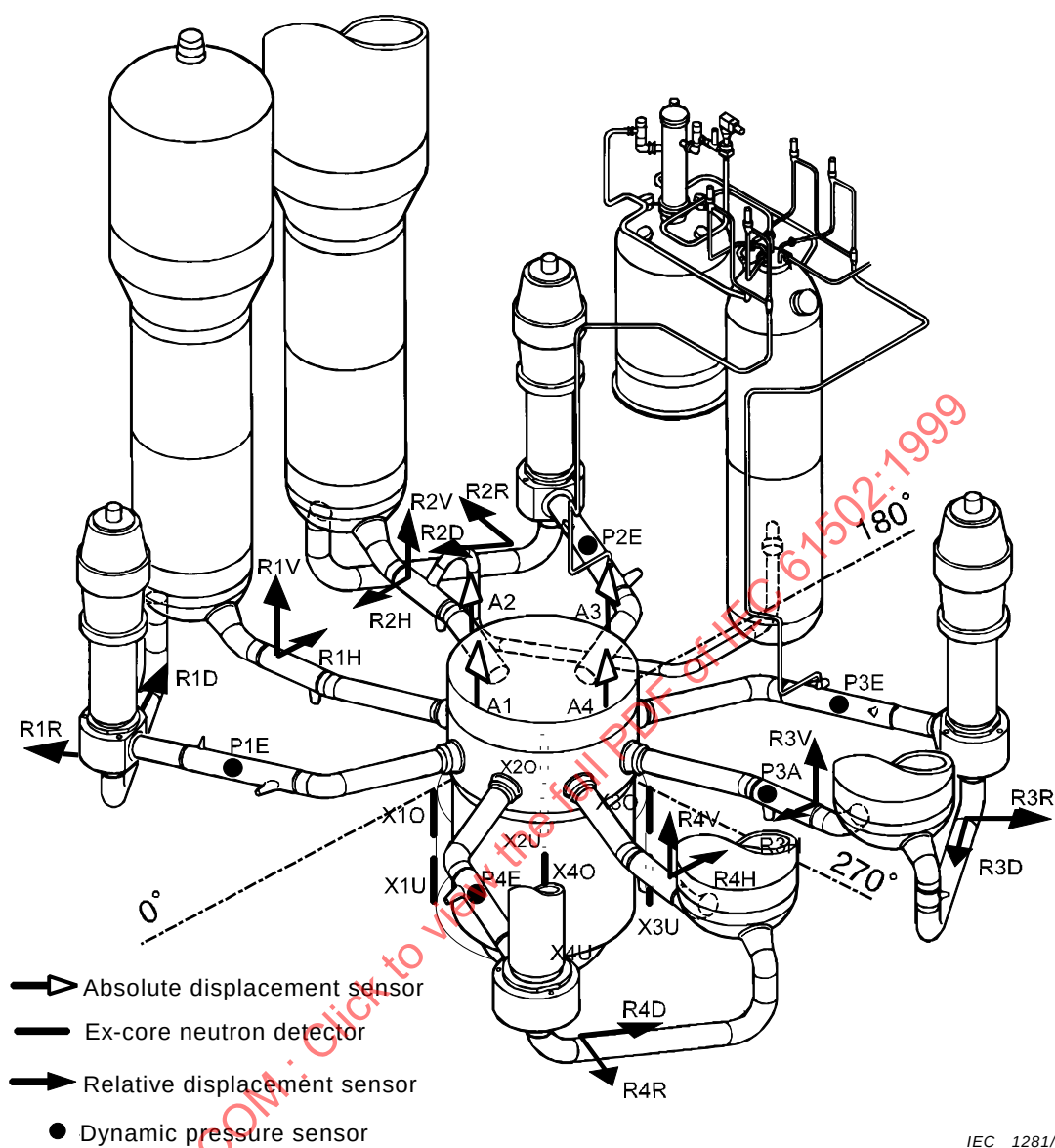
IEC 1280/99

Figure 13 – Example of sampling of neutron noise



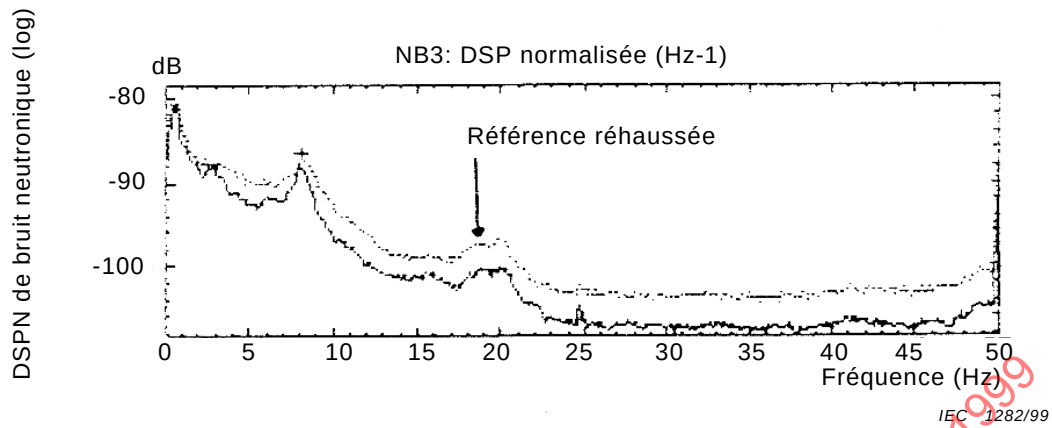
IEC 1281/99

Figure 14 – Système multi-capteurs type pour la surveillance vibratoire d'un REP à quatre boucles (voir [2])



IEC 1281/99

Figure 14 – Typical multi-sensor system for vibration monitoring in a four-loop PWR (see [2])



Valeur efficace globale ($dili$) = $6,27 \times 10^{-4}$

Détection des pics du signal NB3

Pics (Hz)	($dili$)	Déplacement efficace (Mic)	Déplacement crête à crête (Mic)	(Panier)
8,125	$1,61 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{+1}$	$9,90 \times 10^{+1}$	

Dépassement détectés:

2,000 Hz → 0,69 dB

Figure 15 – Exemple de traitement d'une DSPN par le système de surveillance