

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
994

Première édition
First edition
1991-01

**Guide pour la mesure *in situ* des vibrations
et fluctuations sur machines hydrauliques
(turbines, pompes d'accumulation
et pompes-turbines)**

**Guide for field measurement of vibrations
and pulsations in hydraulic machines (turbines,
storage pumps and pump-turbines)**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 994: 1991

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

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 60000 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
994**

Première édition
First edition
1991-01

**Guide pour la mesure *in situ* des vibrations
et fluctuations sur machines hydrauliques
(turbines, pompes d'accumulation
et pompes-turbines)**

**Guide for field measurement of vibrations
and pulsations in hydraulic machines (turbines,
storage pumps and pump-turbines)**

© IEC 1991 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

XB

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

CORRIGENDUM 1

Page 6 - AVANT-PROPOS

Dans la liste des publications citées de la CEI,
à la cinquième ligne, au lieu de

*** Actuellement document 4(Bureau Central)48

lire:

CEI 41 (1991): Essais de réception sur place des
turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et
pompes-turbines en vue de la détermination de leurs
performances (troisième édition)

Corrections en anglais uniquement

Page 7 - PREFACE

In the list of other IEC publications quoted, fifth line,
instead of

*** At present Document 4(Central Office)48

read:

IEC 41 (1991): Field acceptance tests to deter- mine
the hydraulic performance of hydraulic turbines,
storage pumps and pump-turbines (third edition)

Page 17 – Subclause 2.3.2.7

In the definitions column, third line, instead of
...quantity. A is... read **...quantity, A is...** (comma instead
of full stop) *

Page 19

In the footnote, at end of first line, instead of ...N in
the denomination... read **...N in the denominator...**

Page 21

In the definitions column, fifth line, instead of
...function, X(t) over... read **...function X(t) over...**
(no comma)

Page 25 – 2.3.4.11

In the definitions column, first and second line,
instead of ...length of the connecting pipe connecting
the pressure transducer... read **...length of the pipe
connecting the pressure transducer...**

Page 41 – 4.1.1

In item d), second and third line, instead of
...unbalance; also and if... read **...unbalance and
also if...**

4.1.3 - In the first line, instead of ...to the machine
water passages... read **...to the water passages...**

* Bold types are for clarity only

*In the eighth line, instead of ...in the draft tube at a distance of $0.5 D_5$ to $1.0 D_5$ from... read ...**0.5 to 1.0 times the suction diameter of the runner (D_S) from...***

*Tenth line, instead of ... $0.2 D_5 - 0.8 D_5$ from... read ... **$0.2 D_S - 0.8 D_S$ from...***

*Eleventh line, instead of ... D_5 being... read ... **D_S being...***

*Twelfth line, instead of ...outer contour of the elbow, read ...**outer side of the elbow.***

*Item b), instead of ...thrust bearing load pulsations, by means of strain measurements on every bearing element; read ...**thrust bearing load pulsations, on every bearing element by means of strain measurements;***

*In item b), first line, instead of ...and runner blade angle... read ...**and runner/impeller blade angle...***

*In the second line, instead of ...position of a runner vane or nozzle and/or guide blade... read ...**position of a guide vane or nozzle and/or runner blades...***

*Au point b), au lieu de
Limite supérieure de fréquence**:
— turbines Pelton:
lire **Limite supérieure de fréquence:**
— turbines Pelton***

Corrections en anglais uniquement

*In item b), instead of Upper frequency**:
— for Pelton turbines:
read **Upper frequency:**
— for Pelton turbines***

In the first footnote (), end of first line, instead of ...lower than the vortex rope... read ...**lower than the suction vortex...***

*In the second line, instead of ...any measuring point. read ...**any measuring operating condition.***

*In the seventh line (second dash), remove the words ...(see Figure 7)... and place them in next line so as to obtain ...**are eliminated (see Figure 7).***

*In the seventh line, instead of ...A/D conversion... read ...**A/D (analog to digital) conversion...***

Page 95 – 9.2.4

Ninth line, instead of Only in the last case is phase information preserved, *read:* **Only in the last case phase information is preserved.**

Page 99 – 10.3

In the second line, instead of ...should be agreed with the concerned parties,... *read* **...should be agreed between the concerned parties,...**

Page 103 – Clause A2.

In the last but one line, instead of ...conversion of the signals from the three signals... *read* **...conversion of the three signals...**

Page 108 – Article B2.

Dans la dernière formule de la page, ajouter un signe moins à la suite du second signe égale (= -)

Page 109 – B2.

In the last formula of the page, add a minus sign just after the second equal sign (= -)

Corrections en anglais uniquement

Page 115 – C7.

In the fifth line (third dash), instead of (...recorder or plotter, output)... *read* **(...recorder or plotter output)...** (no comma)

Page 117 – Figure C1.

In the heading of the table, last column, instead of Conditions test/... *read* **Test conditions/...**

Page 118 – Figure C2.

Sous le tableau, à la cinquième ligne (4ème tiret), au lieu de
– rendement de la pompe ou de la turbine,
lire
– rendement de la pompe ou de la turbine, **etc.**

Page 119 – Figure C2.

Below the table, fifth line (4th dash), instead of
– turbine or pump efficiency,
read
– turbine or pump efficiency, **etc.**

Page 132 – Figure D1.

Dans le schéma, au lieu de II_B lire II

Page 133 – Figure D1.

In the diagram, instead of II_B read II

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60994:1997

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
INTRODUCTION	8

SECTION UN — GÉNÉRALITÉS

Articles

1. Domaine d'application et objet	10
1.1 Domaine d'application	10
1.2 Objet	10
1.3 Restrictions	12
2. Termes, définitions, symboles et unités	12
2.1 Unités	12
2.2 Termes	12
2.3 Liste des termes spécifiques à ce guide	14
2.4 Classification des machines hydrauliques	26
3. Garanties	40

SECTION DEUX — EXÉCUTION DES ESSAIS

4. Conditions à remplir pour l'essai	40
4.1 Conditions de fonctionnement dans lesquelles sont réalisées les mesures	40
4.2 Vérification sur la machine avant le début des essais	42
5. Procédure d'essai	42
5.1 Paramètres déterminant le point de fonctionnement	42
5.2 Grandeurs vibratoires et fluctuantes à mesurer et localisation des points de mesure	46
5.3 Personnel	50
5.4 Accord sur la procédure d'essai	50
5.5 Programme d'essais	52
5.6 Préparation des essais	52
5.7 Observations	54
5.8 Reprise des essais	56

SECTION TROIS — MÉTHODES DE MESURE, SAISIE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

6. Considérations relatives aux méthodes de mesure	58
6.1 Vibrations	58
6.2 Vibrations radiales de l'arbre par rapport aux paliers	64
6.3 Fluctuations de pression	64
6.4 Contraintes	66
6.5 Fluctuations du couple sur l'arbre	66
6.6 Fluctuations de la vitesse de rotation	70
6.7 Fluctuations de puissance	70
6.8 Fluctuations du couple sur les directrices	70
6.9 Fluctuations de poussée radiale sur les paliers-guides	70
6.10 Fluctuations de poussée axiale sur le palier de butée	74
6.11 Grandeurs mesurées définissant le point de fonctionnement de la machine	74

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
INTRODUCTION	9

SECTION ONE — GENERAL

Clause

1. Scope and object	11
1.1 Scope	11
1.2 Object	11
1.3 Excluded topics	13
2. Terms, definitions, symbols and units	13
2.1 Units	13
2.2 Terms	13
2.3 List of terms specific to this guide	15
2.4 Classification of hydraulic machines	27
3. Guarantees	41

SECTION TWO — EXECUTION OF TESTS

4. Test conditions to be fulfilled	41
4.1 Operating conditions under which measurements are performed	41
4.2 Checks on the machine before the beginning of tests	43
5. Test procedure	43
5.1 Parameters determining the operating point	43
5.2 Vibration and pulsation quantities to be measured and locations of measuring points	47
5.3 Personnel	51
5.4 Agreement of test procedure	51
5.5 Test programme	53
5.6 Preparations for tests	53
5.7 Observations	55
5.8 Repetition of tests	57

SECTION THREE — METHODS OF MEASUREMENT, DATA ACQUISITION AND PROCESSING

6. Considerations relating to the methods of measurement	59
6.1 Vibrations	59
6.2 Radial vibrations of the shaft relative to the bearings	65
6.3 Pressure pulsations	65
6.4 Stresses	67
6.5 Shaft torque pulsations	67
6.6 Rotational speed pulsations	71
6.7 Power pulsations	71
6.8 Guide vane torque pulsations	71
6.9 Radial thrust pulsations measured at the guide bearings	71
6.10 Axial thrust pulsations measured at the thrust bearing	75
6.11 Measured quantities defining the machine operating point	75

7. Étalonnage	74
7.1 Généralités	74
7.2 Étalonnage direct	76
7.3 Étalonnage par signaux électriques de référence	80
8. Enregistrement	82
8.1 Enregistreurs graphiques	82
8.2 Enregistreurs à bande magnétique	84
8.3 Enregistrement numérique	84
9. Saisie et traitement des données	86
9.1 Généralités	86
9.2 Choix des méthodes de traitement des données	88
10. Incertitudes de mesure	96
11. Rapport final	98
ANNEXE A — Formules de calcul des contraintes principales et de traitement des signaux dans les mesures de déformations dynamiques à l'aide de rosettes	100
ANNEXE B — Formules de calcul du couple sur un arbre cylindrique plein et de la charge axiale sur une bielle de section rectangulaire ou cylindrique selon la technique des jauges extensométriques	108
ANNEXE C — Exemple de rapport final	112
ANNEXE D — Distorsion des mesures de fluctuations de pression pour des capteurs montés avec conduit de raccordement	130

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 994:1991

7. Calibration	75
7.1 General	75
7.2 Direct calibration	77
7.3 Calibration by electrical reference signals	81
8. Recording	83
8.1 Graphical recorders	83
8.2 Magnetic tape recorders	85
8.3 Digital recording	85
9. Data acquisition and processing	87
9.1 General	87
9.2 Selection of data processing methods	89
10. Measurement uncertainties	97
11. Final report	99
APPENDIX A — Formulae for calculating principal stresses and signal processing for dynamic strain measurements with rosettes	101
APPENDIX B — Formulae for calculating the torque on a cylindrical solid shaft and the axial load on a rectangular or circular section link using the strain gauge technique	109
APPENDIX C — Example of final report	113
APPENDIX D — Distortion of pressure pulsation measurements for transducers mounted with connecting pipe	131

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

GUIDE POUR LA MESURE *IN SITU* DES VIBRATIONS ET FLUCTUATIONS SUR MACHINES HYDRAULIQUES (TURBINES, POMPES D'ACCUMULATION ET POMPES-TURBINES)

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes n° 4 de la CEI: Turbines hydrauliques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
4(BC)45	4(BC)50

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans la présente norme:

- Publications n°s
- 184 (1965): Méthodes de spécification des caractéristiques relatives aux transducteurs électromécaniques destinés aux mesures de chocs et de vibrations.
 - 222 (1966): Méthodes de spécification des caractéristiques relatives à l'équipement auxiliaire pour les mesures de chocs et de vibrations.
 - *** Actuellement document 4(Bureau Central)48.

Autres publications citées:

- Normes ISO
- 2041 (1975): Vibrations et chocs — Vocabulaire. Edition bilingue.
 - 3945 (1985): Vibrations mécaniques des grandes machines tournantes dans la gamme des vitesses comprises entre 10 et 200 tr/s — Mesurage et évaluation de l'intensité vibratoire *in situ*.
 - 5347-0 (1987): Méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs — Partie 0: Concepts de base.
 - 5348 (1987): Vibrations et chocs mécaniques — Fixation mécanique des accéléromètres.
 - 7919-1 (1986): Vibrations mécaniques des machines non alternatives — Mesurages sur les arbres tournants et évaluation — Partie 1: Directives générales.
 - 8042 (1988): Mesurage des chocs et des vibrations — Caractéristiques à spécifier pour les capteurs sismiques.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

GUIDE FOR FIELD MEASUREMENT OF VIBRATIONS AND PULSATIONS IN HYDRAULIC MACHINES (TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES)

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 4: Hydraulic turbines.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
4(CO)45	4(CO)50

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

Other IEC Publications quoted in this standard:

- Publication Nos. 184 (1965): Methods for specifying the characteristics of electro-mechanical transducers for shock and vibration measurements.
- 222 (1966): Methods for specifying the characteristics of auxiliary equipment for shock and vibration measurement.
- *** At present Document 4(Central Office)48.

Other publications quoted:

- ISO standards 2041 (1975): Vibration and shock — Vocabulary. Bilingual edition.
- 3945 (1985): Mechanical vibration of large rotating machines with speed range from 10 to 200 tr/s — Measurement and evaluation of vibration severity *in situ*.
- 5347-0 (1987): Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups — Part 0: Basic concepts.
- 5348 (1987): Mechanical vibration and shock — Mechanical mounting of accelerometers.
- 7919-1 (1986): Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation — Part 1: General guidelines.
- 8042 (1988): Shock and vibration measurements — Characteristics to be specified for seismic pick-ups.

GUIDE POUR LA MESURE *IN SITU* DES VIBRATIONS ET FLUCTUATIONS SUR MACHINES HYDRAULIQUES (TURBINES, POMPES D'ACCUMULATION ET POMPES-TURBINES)

INTRODUCTION

Dans une machine en fonctionnement, on constate toujours l'existence de fluctuations et de vibrations qui ne peuvent être évitées et qui ne compromettent pas par elles-mêmes la vie de l'installation où on les observe. Elles sont quantitativement fonction de nombreux facteurs tels que le type d'écoulement dans les conduits hydrauliques sous différentes conditions d'exploitation de l'installation, les particularités de conception mécanique ainsi que la qualité de la construction, du montage et de l'entretien. Ce n'est que quand certaines parties de la machine ou de l'installation sont soumises à des efforts dangereux pour sa résistance ou quand des perturbations inacceptables sont transmises à son environnement, que ces fluctuations et ces vibrations peuvent être qualifiées d'excessives.

Dans des cas extrêmes, les vibrations des machines hydrauliques peuvent entraîner la formation de fissures, voire la rupture de certaines pièces par fatigue*.

Des vibrations excessives sur les machines hydrauliques, non seulement réduisent leur durée de bon fonctionnement, mais se répercutent aussi sur le fonctionnement des systèmes et instruments de commande et influent sur le comportement des structures connectées ainsi que sur l'état de santé du personnel.

La mesure des caractéristiques des fluctuations et des vibrations, ou de préférence de leurs effets, doit être faite conformément au présent guide qui fournit également les informations nécessaires pour déduire la valeur des grandeurs physiques des indications des appareils de mesure.

Dans l'état actuel des connaissances, on peut seulement espérer que des mesures réalisées conformément au présent guide feront apparaître une caractéristique fondamentale permettant de lier statistiquement les fluctuations et les vibrations à leurs effets, avec un intervalle de confiance acceptable.

L'étude vibratoire d'une machine hydraulique est une opération longue et difficile donc coûteuse (notamment en disponibilité), qui ne doit être entreprise que si des mesures limitées de sollicitation ou de mouvement font craindre un danger réel. Le but d'une telle étude est, si possible, de supprimer la source des sollicitations excessives après l'avoir identifiée ou, à défaut, de définir une procédure d'exploitation réduisant ces sollicitations à un niveau acceptable. Les sources de perturbations sont nombreuses mais un très petit nombre d'entre elles, voire une seule, crée une réelle difficulté sur une machine donnée.

En règle générale, l'état vibratoire d'une machine hydraulique s'évalue par des essais qui consistent à mesurer la vibration en divers points caractéristiques de la structure. Un montage expérimental standard, conçu en fonction de la pratique et de l'expérience réunies, devrait suffire à donner des indications suffisantes sur l'état vibratoire général de la machine. L'examen des résultats ainsi obtenus peut néanmoins attirer parfois l'attention sur de fortes amplifications locales (résonances) de certaines pièces vitales de la machine; si tel est effectivement le cas, il convient de se livrer à un examen plus approfondi des pièces en question par un montage d'essai approprié. Le

* Par le passé, les défaillances imputables à la fatigue étaient chose rare dans les machines hydrauliques. Toutefois, la tendance actuelle à l'augmentation des charges spécifiques et à l'économie de matière dans la conception des machines hydrauliques entraîne une diminution de la rigidité dynamique de la structure, ce qui peut accroître le risque d'un excès de vibrations dans les machines de conception récente. L'accroissement des dimensions des installations dû à l'augmentation de leur capacité peut, lui aussi, entraîner un abaissement des fréquences caractéristiques de vibration de la machine ou de certains de ses éléments (directrices, etc.) Les fréquences en question pourraient donc entrer plus facilement en interaction avec les fréquences des oscillations hydrauliques et, le cas échéant, électriques du système (ou avec leurs harmoniques).

GUIDE FOR FIELD MEASUREMENT OF VIBRATIONS AND PULSATIONS IN HYDRAULIC MACHINES (TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES)

INTRODUCTION

On a machine in service, pulsations and vibrations which cannot be avoided and which do not affect by themselves the service life of the plant where they occur, can always be observed. Their values depend on many factors, among which are the flow pattern in the water passages under different operating conditions of the unit, peculiarities of the design as well as the thoroughness of manufacture, erection and maintenance. Such pulsations and vibrations can be considered as detrimental only when certain parts of the machine or of the plant are subject to forces that may impair its resistance or when unacceptable disturbances are carried to its environment.

In extreme cases, vibrations in hydraulic machines can result in the formation of cracks and even in fracture of components due to fatigue*.

Excessive vibration in hydraulic machines not only can reduce their trouble-free service life but can also affect operation of governing systems and instruments, the behaviour of the attached structures and the health of personnel.

Measurement of pulsation and vibration characteristics or, preferably, of their effects is to be carried out in accordance with this guide which also gives the information necessary to derive the value of the physical quantities from the readings of the measuring instruments.

Given the present state of knowledge, it can only be hoped that measurements made in compliance with this guide will reveal a basic characteristic making it possible to relate pulsations and vibrations to their effects statistically, with an acceptable confidence level.

Vibration studies of a hydraulic machine represent a long and difficult operation and hence are expensive (particularly as regards the non-availability of the machine) and therefore should be undertaken only if a limited number of measurements of stresses or movements indicates the possibility of a real danger. The purpose of such work is, if possible, to eliminate the source of detrimental loadings after having identified it or, should this not be practicable, to define an operating procedure reducing such loadings to an acceptable level. There are many sources of disturbances but a very small number of them, and even one only, may create a real problem on a given machine.

As a rule, the vibrational state of a hydraulic machine is assessed from tests in which the vibration is measured at individual characteristic points of the structure. A standard experimental set-up, designed on the basis of good practice and experience, should already yield sufficient indications about the general vibrational conditions of the machine. However, examination of results thus acquired can sometimes point to strong local amplification (resonance) in some vital parts of the machine; if such is the case, the affected part(s) should be more closely investigated by means of an appropriate experimental arrangement. Flow pattern in the water passages may have

* In previous years fatigue failures in hydraulic machines were few in number. However, the current tendency to increase specific loads and to save material in the design of hydraulic machines can lead to lowering of dynamic rigidity of the structure, which may increase the risk of vibration in newly designed machines. Also the increase in geometrical dimensions stemming from increasing unit capacity can lead to a lowering of characteristic vibration frequencies of the machine or of some parts thereof (guide vanes, etc.). Thus the frequencies in question could more easily interact with the frequencies of hydraulic and/or electrical oscillations in the system (or harmonics thereof).

type d'écoulement dans les conduits hydrauliques peut avoir un effet important sur les vibrations des machines hydrauliques. Pour obtenir une analyse précise des vibrations, il est courant de comparer les mesures de vibrations effectuées en des endroits appropriés (voir 5.2.1 et 5.2.2) avec des mesures de fluctuations* d'autres paramètres importants, effectuées également en des endroits appropriés. Ces autres paramètres peuvent être:

- fluctuations de pression (voir 5.2.3);
- fluctuations des déformations locales et des contraintes correspondantes (voir 5.2.4);
- fluctuations du couple sur l'arbre (voir 5.2.5);
- fluctuations de la vitesse de rotation (voir 5.2.6);
- fluctuations de la puissance (voir 5.2.7);
- fluctuations du couple sur les directrices (voir 5.2.8);
- fluctuations de la poussée radiale sur les palier-guides (voir 5.2.9);
- fluctuations de la poussée axiale sur le palier de butée (voir 5.2.10);

et, si besoin est, d'autres paramètres encore.

Il est hors de question que les mesures énumérées dans le présent guide soient toujours toutes effectuées.

SECTION UN — GÉNÉRALITÉS

1. Domaine d'application et objet

1.1 *Domaine d'application*

1.1.1 Le présent guide s'applique à tout type de turbine à réaction ou à action, ainsi qu'à tout type de pompe-turbine et de pompe d'accumulation, couplée à un alternateur ou à un moteur.

1.1.2 Le présent guide couvre le domaine des essais de vibrations et de fluctuations qualifiés d'essais standards.

Les objectifs de ces essais sont les suivants:

- Evaluation de la conception de machines hydrauliques et de la qualité de la construction du point de vue des vibrations**.
- Evaluation des modifications du comportement vibratoire durant la vie de la machine.
- Proposition de recommandations s'appliquant au fonctionnement de l'installation (choix des séquences de transitoires les plus appropriées par exemple).
- Aide à l'analyse en cas d'anomalie ou d'incident.

1.1.3 Si, dans certains cas, il n'est pas possible d'appliquer les recommandations de ce guide, soit en raison de l'agencement de la machine hydraulique soit parce que, dans tel cas précis, il n'est pas nécessaire d'effectuer certaines mesures, celles-ci pourront être omises après accord préalable entre le constructeur et l'utilisateur.

1.2 *Objet*

1.2.1 Etablir des règles uniformes à appliquer lors d'essais de vibrations et de fluctuations. Etablir des méthodes de mesure et de traitement des données d'essais.

* Par le terme «fluctuation», on entend dans ce guide une variation périodique (ou quasi périodique), indépendamment de sa fréquence.

** Les recommandations relatives à l'évaluation de l'état vibratoire et fluctuant de la machine ne seront pas élaborées tant que des données systématiques n'auront pas été collectées conformément au présent guide et n'auront pas été interprétées de façon adéquate.

important effects on the vibrations of hydraulic machines. In order to obtain an accurate vibration analysis, it is common practice to relate appropriately located measurements of vibrations (see 5.2.1 and 5.2.2) with appropriately located measurements of pulsations* of other important quantities, such as:

- pressure pulsations (see 5.2.3);
- pulsations of local strains and corresponding stresses (see 5.2.4);
- shaft torque pulsations (see 5.2.5);
- rotation speed pulsation (see 5.2.6);
- power pulsations (see 5.2.7);
- guide vane torque pulsations (see 5.2.8);
- radial thrust pulsations measured at guide bearings (see 5.2.9);
- axial thrust pulsations measured at thrust bearing (see 5.2.10);

and, if need be, also other quantities.

It is in no way intended that all the measurements listed in this guide should be carried out in every case.

SECTION ONE — GENERAL

1. Scope and object

1.1 Scope

- 1.1.1 This guide applies to any type of reaction or impulse turbine, as well to any type of pump-turbine and storage pump, coupled to an electric generator or motor.
- 1.1.2 The guide covers the field of vibration and pulsation tests referred to as standard tests.

The objectives of the tests are as follows:

- Assessment of hydraulic machine design, manufacture and quality of erection from the viewpoint of vibration**.
- Assessment of the changes of vibration behaviour during the machine life.
- Provision of recommendations applying to operation of unit (for instance, choice of the most appropriate transient sequences).
- Aid in analysing faults and break downs.

- 1.1.3 If it is not possible to apply the recommendations of the guide because of the construction of the hydraulic machine, or if it is not necessary to conduct some of the measurements, such items may be omitted on prior agreement between the manufacturer and the user.

1.2 Object

- 1.2.1 To establish uniform rules to be applied when carrying out vibration and pulsation tests. To establish methods of measuring and of test data processing.

* In this guide, the term “pulsation” is understood to mean any periodic (or quasi-periodic) fluctuation, irrespective of its frequency.

** Recommendations on assessment of the vibrational and pulsatory state of the machine will not be prepared until systematic data have been accumulated in accordance with this guide and have been properly interpreted.

- 1.2.2 Indiquer des critères permettant une approche homogène quant à la comparaison des vibrations et fluctuations de différentes machines hydrauliques d'une même classe (voir 2.4).
- 1.2.3 S'assurer la possibilité d'accumuler des données expérimentales suffisamment homogènes sur différentes machines hydrauliques.

1.3 Restrictions

- 1.3.1 Le présent guide exclut tous les sujets d'intérêt purement commercial.
- 1.3.2 Le présent guide n'a pas pour objet des essais de vibrations et de fluctuations particuliers, réalisés à des fins de recherche, bien qu'il soit recommandé dans ce cas d'appliquer les méthodes décrites ici pour les essais habituels de vibrations et de fluctuations.
- 1.3.3 Les essais de vibrations et de fluctuations sur modèle en laboratoire, ainsi que les essais réalisés en atelier sur des parties réelles de la machine non assemblée, ne sont pas traités dans ce guide.
Toutefois, si des essais de fluctuations sur modèle sont disponibles, il convient de les prendre en considération.
- 1.3.4 Les problèmes de vibrations des ouvrages de génie civil et des parties de la machine électrique autres que le(s) palier(s) ou l'arbre ainsi que les fluctuations de pression dans les conduits hydrauliques externes de la machine*, ne sont pas traités dans ce guide.
Toutefois, dans certains cas, lorsque les causes des vibrations excessives d'une machine hydraulique sont incertaines ou peuvent influencer d'autres parties de l'installation, il peut être judicieux de procéder à un examen des ouvrages de génie civil et, le cas échéant, de la machine électrique, de même que des conduits hydrauliques externes à la machine.
- 1.3.5 Le guide exclut les recommandations relatives à l'identification et à l'élimination des causes de vibrations.
- 1.3.6 Bien que les mesures et analyses de bruit puissent très souvent, à condition d'être correctement effectuées, constituer un outil de diagnostic utile pour évaluer les perturbations vibratoires d'une machine hydraulique, le présent guide ne tient compte que des vibrations mécaniques à l'exclusion des effets acoustiques (bruit).
- 1.3.7 Dans un aménagement hydroélectrique, les systèmes de réglage peuvent interagir avec des phénomènes de «fluctuations» de grandeurs hydrauliques, mécaniques et électriques. Cependant, l'étude de ces interactions ainsi que la mise en place d'essais réalisés en injectant artificiellement un signal sinusoïdal dans la boucle de réglage (comme cela est souvent fait pour déterminer la réponse fréquentielle du système) ne font pas partie du domaine d'application de ce guide.

2. Termes, définitions, symboles et unités

2.1 Unités

Le Système International d'Unités (S.I.) est utilisé tout au long de ce guide.

2.2 Termes

Les termes, définitions et symboles se rapportant aux turbines, pompes d'accumulation et pompes-turbines hydrauliques sont conformes à la Publication de la CEI 000***. Les termes non définis en 2.3 le sont dans les publications ci-dessus mentionnées.

* En cas d'absence de vanne(s), les conduites entre les sections de référence haute et basse pression, telles qu'elles sont définies pour les garanties (voir la Publication CEI 000***) sont considérées comme faisant partie de la machine.

*** Actuellement document 4(Bureau Central)48.

- 1.2.2 To indicate criteria for a unified approach to the comparison of vibrations and pulsations of different hydraulic machines of the same class (see 2.4).
- 1.2.3 To ensure the possibility of accumulating actual data of sufficient homogeneity on different hydraulic machines.

1.3 *Excluded topics*

- 1.3.1 The guide excludes all matters of purely commercial interest.
- 1.3.2 The guide is not concerned with special vibration and pulsation tests for research purposes, although it is recommended that the methods described in the guide be applied to usual vibration and pulsation tests.
- 1.3.3 Laboratory model vibration and pulsation tests and tests of separate full-sized parts in the workshop are not dealt with in this guide.

However, if pulsation tests on a model are available, they should be taken into consideration.

- 1.3.4 The problems related to the vibrations of civil engineering works and of parts of the electrical machine other than bearing(s) or the shaft, as well as the pressure pulsations in the waterways external to the machine*, are not dealt with in the guide.

However, in specific cases, when the causes of excessive vibration of a hydraulic machine are uncertain or might be influencing other parts of the plant, it may be appropriate to inspect the civil engineering work structures and/or the electrical machine as well as the waterways external to the machine.

- 1.3.5 The guide excludes recommendations on identifying and eliminating causes of vibrations.
- 1.3.6 Although quite often noise measurements and noise analysis, if adequately performed, can be a useful diagnostic tool to assess vibratory troubles of a hydraulic machine, this guide considers only mechanical vibrations to the exclusion of acoustical effects (noise).
- 1.3.7 Regulation systems may interact with phenomena of “pulsations” of hydraulic, mechanical and electrical quantities in a hydroelectric power plant. However, treatment of such interactions or guidelines for conducting artificial-excitation test by injecting a sine signal in the governor loop (as is often done e.g. to determine the frequency response of the system) are outside the scope of this guide.

2. **Terms, definitions, symbols and units**

2.1 *Units*

The International System (SI) is used throughout this guide.

2.2 *Terms*

The terms, definitions and symbols relating to hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines are in compliance with the IEC Publication 000***. The terms not defined in 2.3 can be found in the publication just mentioned.

* In the case of absence of valves and/or gates, the machine is understood to include waterways between high pressure/low pressure reference sections, as specified for guarantees (see IEC Publication 000***).

*** At present Document 4(Central Office)48.

Les termes, définitions et symboles se rapportant aux vibrations et fluctuations ainsi que les termes mathématiques sont conformes à la Norme ISO 2041 et aux Publications 184 et 222 de la CEI.

2.3 Liste des termes spécifiques à ce guide

Dans le tableau ci-dessous, on trouvera les termes, symboles et unités relatifs aux vibrations et fluctuations, qui sont utilisés dans ce guide.

	Termes	Définitions	Symboles	Unités
2.3.1	<i>Termes se rapportant à la description des vibrations et des fluctuations en fonction du temps*</i>			
2.3.1.1	Déplacement dynamique absolu	(voir CEI 184)	$u(t)$	m
2.3.1.2	Vitesse dynamique absolue	(voir CEI 184)	$v(t)$	m/s
2.3.1.3	Accélération dynamique absolue	(voir CEI 184)	$w(t)$	m/s ²
2.3.1.4	Déplacement dynamique relatif entre deux pièces, p.ex. entre l'arbre et la pièce de fixation du capteur de proximité ($d = 0$ lorsque l'arbre touche le capteur)		$d(t)$	m
2.3.1.5	Fluctuation de pression	Variation oscillatoire de la pression du liquide par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{p}(t)$	Pa
2.3.1.6	Fluctuation de déformation	Variation oscillatoire de la déformation par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{\varepsilon}(t)$	m/m
2.3.1.7	Fluctuation de contrainte	Variation oscillatoire de la contrainte par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{\sigma}(t)$	N/m ²
2.3.1.8	Fluctuation du couple sur l'arbre	Variation oscillatoire du couple sur l'arbre par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{M}(t)$	N · m
2.3.1.9	Fluctuation de la vitesse de rotation	Variation oscillatoire de la vitesse de rotation par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{n}(t)$	tr/s
2.3.1.10	Fluctuation de puissance	Variation oscillatoire de la puissance par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{P}(t)$	W
2.3.1.11	Fluctuation du couple sur une directrice	Variation oscillatoire du couple sur la directrice par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{M}_{GV}(t)$	N · m
2.3.1.12	Fluctuation de la poussée radiale sur un palier-guide	Variation oscillatoire de la poussée radiale appliquée sur le palier-guide par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{R}(t)$	N
2.3.1.13	Fluctuation de la poussée axiale sur le palier de butée	Variation oscillatoire de la poussée axiale sur le palier de butée par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement déterminé	$\bar{T}(t)$	N

* Pour les définitions des vibrations et des fluctuations, voir 2.3.2.

The terms, definitions and symbols relating to vibrations and pulsations as well as mathematical terms are in compliance with ISO Standard 2041 and IEC Publications 184 and 222.

2.3 List of terms specific to this guide

Tabulated below are the terms, symbols and units relating to vibrations and pulsations adopted throughout this guide.

	Terms	Definitions	Symbols	Units
2.3.1	<i>Terms relating to description of vibrations and pulsations as functions of time*</i>			
2.3.1.1	Dynamic absolute displacement	(see IEC 184)	$u(t)$	m
2.3.1.2	Dynamic absolute velocity	(see IEC 184)	$v(t)$	m/s
2.3.1.3	Dynamic absolute acceleration	(see IEC 184)	$w(t)$	m/s ²
2.3.1.4	Dynamic relative displacement between two parts e.g. the shaft and the part on which the proximity transducer is fixed ($d = 0$ when the shaft touches the transducer)		$d(t)$	m
2.3.1.5	Pressure pulsation	Oscillatory variation of the pressure of the liquid referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{p}(t)$	Pa
2.3.1.6	Strain pulsation	Oscillatory variation of the strain referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{\epsilon}(t)$	m/m
2.3.1.7	Stress pulsation	Oscillatory variation of the stress referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{\sigma}(t)$	N/m ²
2.3.1.8	Shaft torque pulsation	Oscillatory variation of the shaft torque referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{M}(t)$	N · m
2.3.1.9	Rotational speed pulsation	Oscillatory variation of the rotational speed referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{n}(t)$	rev/s
2.3.1.10	Power pulsation	Oscillatory variation of the power referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{P}(t)$	W
2.3.1.11	Guide vane torque pulsation	Oscillatory variation of the guide vane torque referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{M}_{GV}(t)$	N · m
2.3.1.12	Radial pulsation measured at guide bearing	Oscillatory variation of the radial load on the guide bearing referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{R}(t)$	N
2.3.1.13	Axial pulsation measured at thrust bearing	Oscillatory variation of the axial load on the thrust bearing referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\bar{T}(t)$	N

* For the definitions of vibrations and pulsations see 2.3.2.

	Termes	Définitions	Symboles	Unités
2.3.2	<i>Termes généraux se rapportant à des paramètres utilisés pour décrire des vibrations et des fluctuations*</i>			
2.3.2.1	Vibration	Variation dans le temps d'une grandeur représentative du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque cette grandeur est alternativement supérieure et inférieure à une valeur moyenne de référence		
2.3.2.2	Vibration ou fluctuation périodique	Grandeur dont les valeurs réapparaissent pour des intervalles égaux de la variable indépendante (temps) <i>Note.</i> — Grandeur périodique $X(t)$ fonction du temps t et pouvant s'exprimer sous la forme $X = f(t) = f(t + nT)$ où n est un entier, T un intervalle de temps constant et t le temps courant		
2.3.2.3	Période fondamentale (période)	Intervalle de temps le plus petit pour lequel une fonction périodique du temps se répète (voir 2.3.2.2) <i>Note.</i> — En l'absence de toute ambiguïté, la période fondamentale est appelée «période»	T	s
2.3.2.4	Fréquence	Inverse de la période	f	Hz
2.3.2.5	Harmonique (d'une grandeur périodique)	Composante sinusoïdale (d'une fonction périodique du temps) dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale		
2.3.2.6	Pulsation (fréquence circulaire)	Produit de la fréquence d'un phénomène sinusoïdal par le facteur 2π	ω	rad/s
2.3.2.7	Grandeur purement harmonique; grandeur sinusoïdale	Grandeur périodique qui est une fonction sinusoïdale du temps. Donc $X = A \sin(\omega t + \varphi)$ où $X(t)$ est la grandeur purement harmonique, A est l'amplitude, ω la fréquence circulaire (voir 2.3.2.6), t le temps courant, φ la phase (radians)		
2.3.2.8	Mouvement ou fluctuation purement harmonique	Mouvement ou fluctuation qui est une fonction sinusoïdale du temps		
2.3.2.9	Angle de phase; phase (d'une grandeur sinusoïdale)	Si une grandeur sinusoïdale a avancé de mT unités de temps (T étant la période), par comparaison à une valeur de temps prise comme référence, l'angle de phase est $m2\pi$	φ	rad
2.3.2.10	Amplitude	Valeur maximale d'une grandeur sinusoïdale $X(t)$	A	[X] (différentes unités selon la nature physique de X)
2.3.2.11	Valeur crête à crête d'une grandeur oscillatoire**	Différence algébrique entre les valeurs extrêmes de la grandeur. Dans le cas d'une grandeur sinusoïdale, la valeur crête à crête est le double de l'amplitude, soit $2A$	ΔX_{pp}	[X]
2.3.2.12	Vibration ou fluctuation composée	Vibration ou fluctuation consistant en la superposition (somme) de plusieurs vibrations ou fluctuations harmoniques pures <i>Note.</i> — Dans le cas où le rapport de chacune des fréquences à la fréquence fondamentale est un entier, la vibration composée est appelée vibration polyharmonique		

* La définition du terme «fluctuation» est la même que celle du terme «vibration», à cette différence près que la grandeur en jeu ne rend pas compte du mouvement ou de la position d'un système mécanique.

** La valeur crête (ΔX_p [X]) d'une grandeur oscillatoire (par opposition à la valeur crête à crête) est la valeur maximale absolue de l'écart par rapport à la valeur moyenne (voir 2.3.3.1) de la grandeur oscillatoire.

	Terms	Definitions	Symbols	Units
2.3.2	<i>General terms relating to parameters used to describe vibrations and pulsations*</i>			
2.3.2.1	Vibration	The variation with time of a quantity, which is descriptive of the motion or position of a mechanical system, when the magnitude is alternately greater and smaller than some average value of reference		
2.3.2.2	Periodic vibration or pulsation	A quantity whose values recur at equal intervals of the independent variable (time) <i>Note.</i> — A periodic quantity $X(t)$ which is a function of time t , and can be expressed as $X = f(t) = f(t + nT)$ where n is an integer, T is a constant interval of time and t is the running time		
2.3.2.3	Fundamental period (period)	The smallest interval of time for which a periodic function of time repeats itself (see 2.3.2.2) <i>Note.</i> — If there is no ambiguity, the fundamental period is called the period	T	s
2.3.2.4	Frequency	The reciprocal of period	f	Hz
2.3.2.5	Harmonic (of a periodic quantity)	A sinusoidal component (of a composite periodic function of time) whose frequency is an integer multiple of the fundamental frequency		
2.3.2.6	Angular frequency (circular frequency)	The product of the frequency of a sinusoidal phenomenon by the factor 2π	ω	rad/s
2.3.2.7	Simple harmonic quantity; sinusoidal quantity	A periodic quantity that is a sinusoidal function of time. Thus $X = A \sin(\omega t + \varphi)$ where $X(t)$ is the simple harmonic quantity, A is the amplitude, ω is the angular frequency (see 2.3.2.6), t is the running time, φ is the phase angle of the oscillation (radians)		
2.3.2.8	Simple harmonic motion or pulsation	A motion or pulsation that is a sinusoidal function of time		
2.3.2.9	Phase angle; Phase (of a sinusoidal quantity)	If a sinusoidal quantity has advanced through mT units of time (T being the period) as measured from a value of time taken as reference, the phase angle is $m2\pi$	φ	rad
2.3.2.10	Amplitude	The maximum value of a sinusoidal quantity $X(t)$	A	[X] (different units according to the physical nature of X)
2.3.2.11	Peak-to-peak value of an oscillating quantity**	The algebraic difference between the extreme values of the quantity. In the case of a sinusoidal quantity the peak-to-peak value is twice the amplitude, i.e. $2A$	ΔX_{pp}	[X]
2.3.2.12	Compound vibration or pulsation	Vibration or pulsation consisting of the superposition (sum) of several simple harmonic vibrations or pulsations <i>Note.</i> — In cases when the ratio of each of the frequencies of simple harmonic vibrations to fundamental frequency is an integer, compound vibration is called polyharmonic vibration		

* The definition of "pulsation" is the same as that of "vibration", with the difference that the quantity involved is not descriptive of the motion or position of a mechanical system.

** Peak value (ΔX_p , [X]) of an oscillating quantity (as opposed to peak-to-peak value) is the maximum absolute value of the deviation from the mean value (see 2.3.3.1) of the oscillating quantity.

	Termes	Définitions	Symboles	Unités
2.3.2.13	Résonance	Un système soumis à une excitation forcée est à sa résonance lorsqu'une modification, même infime, de la fréquence d'excitation provoque une baisse de la réponse du système		
2.3.2.14	Vibration ou fluctuation aléatoire	Vibration ou fluctuation dont l'amplitude ne peut pas être prévue avec précision à tout instant		
2.3.3	<i>Termes mathématiques</i>			
2.3.3.1	Valeur moyenne; moyenne algébrique	a) La valeur moyenne de grandeurs homogènes discrètes est égale à la somme algébrique de ces grandeurs divisée par le nombre de grandeurs. La valeur moyenne est alors égale à: $\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^N X_n}{N}$ où X_n est la valeur de la nème grandeur, N étant le nombre total de grandeurs discrètes b) La valeur moyenne d'une fonction continue, $X(t)$, sur un intervalle de temps compris entre t_1 et t_2, est égale à: $\bar{X} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} X(t) dt}{t_2 - t_1}$	$\bar{X}$	[X]
2.3.3.2	Ecart type Valeur efficace par rapport à la valeur moyenne	Valeur efficace (r.m.s.) de l'écart d'un ensemble de nombres (ou d'une fonction) par rapport à la valeur moyenne a) Pour un ensemble de nombres $X_1, X_2, \dots, X_N$ $\bar{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N}}$ où l'indice n se rapporte à la nème valeur, N étant le nombre total de grandeurs discrètes de l'ensemble, et $\bar{X}$ la valeur moyenne de cet ensemble (voir 2.3.3.1)* b) Si la grandeur $X(t)$ est une fonction continue de t, sa valeur efficace sur un intervalle compris entre t_1 et t_2 est: $\bar{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} [X(t) - \bar{X}]^2 dt}{t_2 - t_1}}$	$\bar{X}_{\text{eff}}$	[X]
2.3.3.3	Valeur efficace (r.m.s.)	a) La valeur efficace d'un ensemble de nombres est la racine carrée de la moyenne de leurs valeurs au carré. La valeur efficace (r.m.s.) d'un ensemble de nombres peut se représenter comme suit: $X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N X_n^2}{N}}$	X_{rms}	[X]

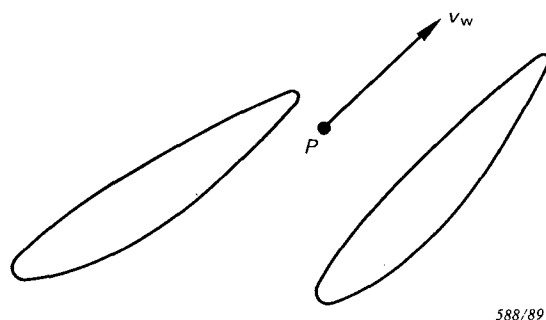
* Parfois la définition de l'écart type des données d'un échantillon remplace le N du dénominateur par $(N-1)$, parce que la formule ainsi modifiée représente une meilleure estimation de l'écart type d'une population de laquelle l'échantillon a été prélevé. Pour les grandes valeurs de N (p.ex. $N > 30$), la différence est quasi nulle.

	Terms	Definitions	Symbols	Units
2.3.2.13	Resonance	Resonance of a system in forced oscillation exists when any change, however small, in the frequency of excitation causes a decrease in the response of the system		
2.3.2.14	Random vibration or pulsation	A vibration or pulsation, of which the magnitude cannot be precisely predicted for any given instant of time		
2.3.3	<i>Mathematical terms</i>			
2.3.3.1	Average value; mean value; algebraic mean value	a) The average value of a number of homogeneous discrete quantities is equal to the algebraic sum of the quantities divided by the number of quantities. The average value is equal to: $\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^N X_n}{N}$ where X_n is the value of nth quantity: N is the total number of discrete quantities b) The average value of a continuous function, $X(t)$, over a time interval between t_1 and t_2 is equal to: $\bar{X} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} X(t) dt}{t_2 - t_1}$	$\bar{X}$	[X]
2.3.3.2	Standard deviation Effective value referred to the mean	The root-mean-square (r.m.s.) value of the deviation of a set of numbers (or a function) from the mean value a) For a set of numbers $X_1, X_2, \dots, X_N$ $\tilde{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N}}$ where the subscript n refers to the n-th value. N is the total number of discrete quantities in the set, $\bar{X}$ is the mean value of the set (see 2.3.3.1)* b) If the quantity $X(t)$ is a continuous function of t, its effective value over an interval between t_1 and t_2 is: $\tilde{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} [X(t) - \bar{X}]^2 dt}{t_2 - t_1}}$	$\tilde{X}_{\text{eff}}$	[X]
2.3.3.3	Root-mean-square value: r.m.s. value (effective value)	a) The root-mean-square (r.m.s.) value of a set of numbers is the square root of the average of their squared values. The r.m.s. value of the set of numbers can be represented as: $X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N X_n^2}{N}}$	X_{rms}	[X]

* Sometimes the standard deviation for the data of a sample is defined with $(N-1)$, replacing N in the denomination because the resulting value represents a better estimate of the standard deviation of a population from which the sample is taken. For larger values of N (i.e. $N > 30$) there is practically no difference.

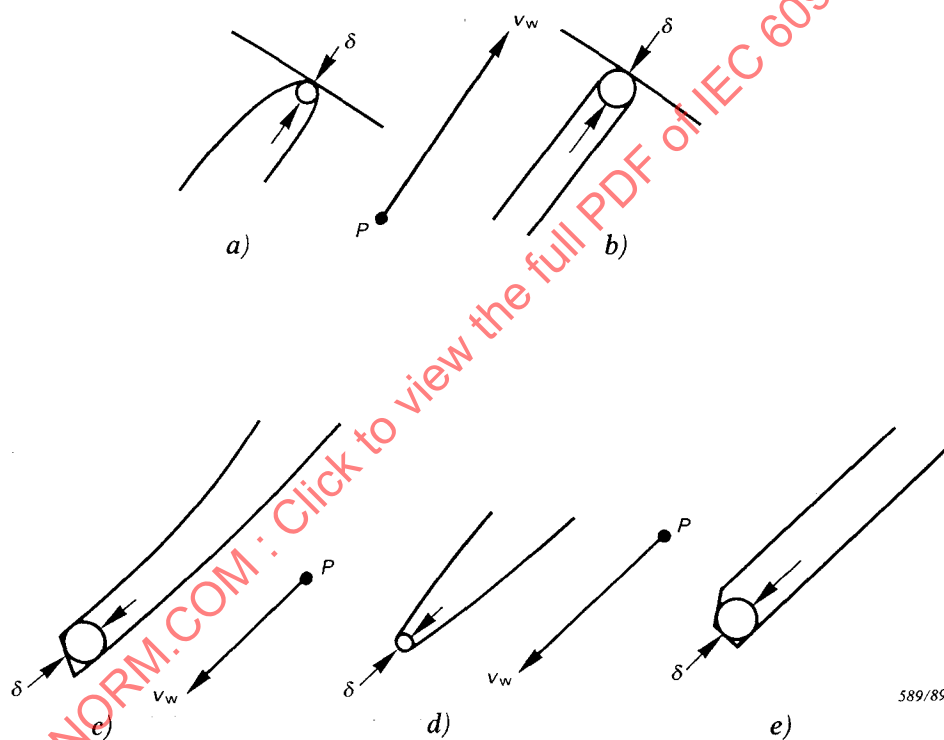
	Termes	Définitions	Symboles	Unités
		où l'indice n se rapporte à la nième valeur, N étant le nombre total de grandeurs homogènes discrètes b) La valeur efficace (r.m.s.) d'une fonction continue $X(t)$ sur un intervalle compris entre t_1 et t_2 est égale à la racine carrée de la moyenne des valeurs au carré de la fonction sur l'intervalle en question. La valeur efficace (r.m.s.) d'une fonction continue à une seule variable $X(t)$ sur un intervalle compris entre t_1 et t_2 est la suivante: $X_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} [X(t)]^2 dt}{t_2 - t_1}}$ <i>Note.</i> — En théorie des vibrations, la valeur moyenne d'une vibration est égale à zéro. Dans ce cas, la valeur efficace X_{rms} est égale à l'écart type $\bar{X}_{eff}$ (voir 2.3.3.2) et la moyenne quadratique X_{rms}^2 est égale à la variance $\bar{X}_{eff}^2$ (voir 2.3.3.4). Pour une grandeur sinusoïdale d'amplitude A, la valeur efficace est $A/\sqrt{2}$		
2.3.3.4	Variance	Carré de l'écart type <i>Note.</i> — Lorsque la valeur moyenne d'une variable est zéro, la variance est la moyenne quadratique de cette variable (voir note 2 pour la moyenne quadratique 2.3.3.5)	$\bar{X}_{eff}^2$	[X ²]
2.3.3.5	Moyenne quadratique	La moyenne quadratique d'une fonction (ou d'un ensemble de nombres, dans un intervalle donné est égale à la moyenne des carrés de la fonction (ou de l'ensemble de nombres) dans ce même intervalle <i>Notes</i> 1. — La moyenne quadratique est le carré de la valeur efficace 2. — Lorsque la moyenne $\bar{X}$ est nulle, la moyenne quadratique est égale à la variance (voir 2.3.3.4) 3. — Si la valeur moyenne $\bar{X}$ n'est pas nulle, alors: $X_{rms}^2 = \bar{X}_{eff}^2 + \bar{X}^2$	X_{rms}^2	[X ²]
2.3.4	<i>Autres termes utilisés</i>			
2.3.4.1	Nombre d'aubes du distributeur ou du diffuseur (machines à réaction), ou nombre d'injecteurs (PELTON)		z_0	
2.3.4.2	Nombre de pales ou d'aubes de la roue (machines à réaction), ou nombre d'augets (PELTON)		z_2	
2.3.4.3	Vitesse d'écoulement	Vitesse relative de l'écoulement sur une partie étudiée, en un point P à spécifier, en dehors de la couche limite (voir figure 1)	v_w	m/s
2.3.4.4	Épaisseur du bord de fuite d'un profil hydraulique (directrice, aube, pale, etc.)	Diamètre maximal d'une sphère tangente aux deux surfaces opposées du profil, à proximité du bord de fuite (voir figure 2)	δ	m
2.3.4.5	Fréquence limite (inférieure, supérieure)	Valeur extrême, inférieure ou supérieure, de la gamme de fréquences du processus étudié	f_l, f_u	Hz

	Terms	Definitions	Symbols	Units
		where the subscript n refers to the n-th value and N is the total number of discrete homogeneous quantities b) The root-mean-square (r.m.s.) value of a continuous function, $X(t)$ over an interval between t_1 and t_2, is equal to the square root of the average of the squared values of the function over the interval. The r.m.s. value of a continuous single-valued function, $X(t)$ over an interval between t_1 and t_2 is: $X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} [X(t)]^2 dt}{t_2 - t_1}}$ <i>Note.</i> — In vibration theory the average or mean value of the vibration is equal to zero. In this case the r.m.s. value X_{rms} is equal to the standard deviation $\bar{X}_{\text{eff}}$ (see 2.3.3.2) and the mean square value X_{rms}^2 is equal to the variance $\bar{X}_{\text{eff}}^2$ (see 2.3.3.4). In the case of a sinusoidal quantity of amplitude A its effective value is $A/\sqrt{2}$		
2.3.3.4	Variance	The square of the standard deviation <i>Note.</i> — When the mean value of a variable is zero, the variance is the mean square value of the variable (see Note 2 under Mean square value, 2.3.3.5)	$\bar{X}_{\text{eff}}^2$	$[X^2]$
2.3.3.5	Mean square value	The mean square value of a function (or set of numbers) over a given interval is equal to the mean of the squared values of the function (or set of numbers) over that interval <i>Notes 1.</i> — The mean square value is the square of the r.m.s. value 2. — When the mean value $\bar{X}$ is zero the mean square value is equal to the variance (see 2.3.3.4) 3. — If the mean value $\bar{X}$ is not zero then: $X_{\text{rms}}^2 = \bar{X}_{\text{eff}}^2 + \bar{X}^2$	X_{rms}^2	$[X^2]$
2.3.4	<i>Other terms utilized</i>			
2.3.4.1	Number of guide or diffuser vanes (reaction machines), or number of Pelton nozzles		z_0	
2.3.4.2	Number of runner impeller blades (reaction machines), or number of Pelton buckets		z_2	
2.3.4.3	Flow velocity	The relative velocity of flow over a part to be investigated, at a point P, outside the thickness of the boundary layer, to be specified (see Figure 1)	v_w	m/s
2.3.4.4	Thickness of trailing edge of a hydraulic profile (guide vane, runner blade, etc.)	Maximum diameter of a sphere tangent to the two opposite surfaces of the profile near the trailing edge (see Figure 2)	δ	m
2.3.4.5	Limit frequency (lower, upper)	The lower and upper frequency values of the frequency range of the process under investigation	f_L, f_U	Hz



588/89

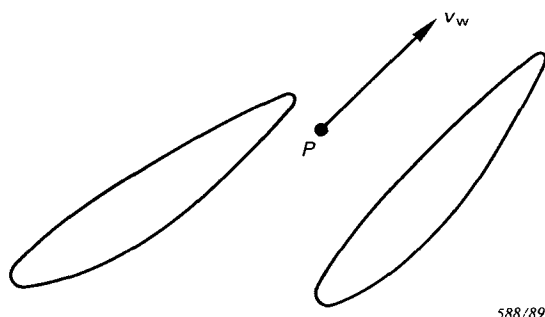
FIG. 1. — Définition de la vitesse d'écoulement*.



589/89

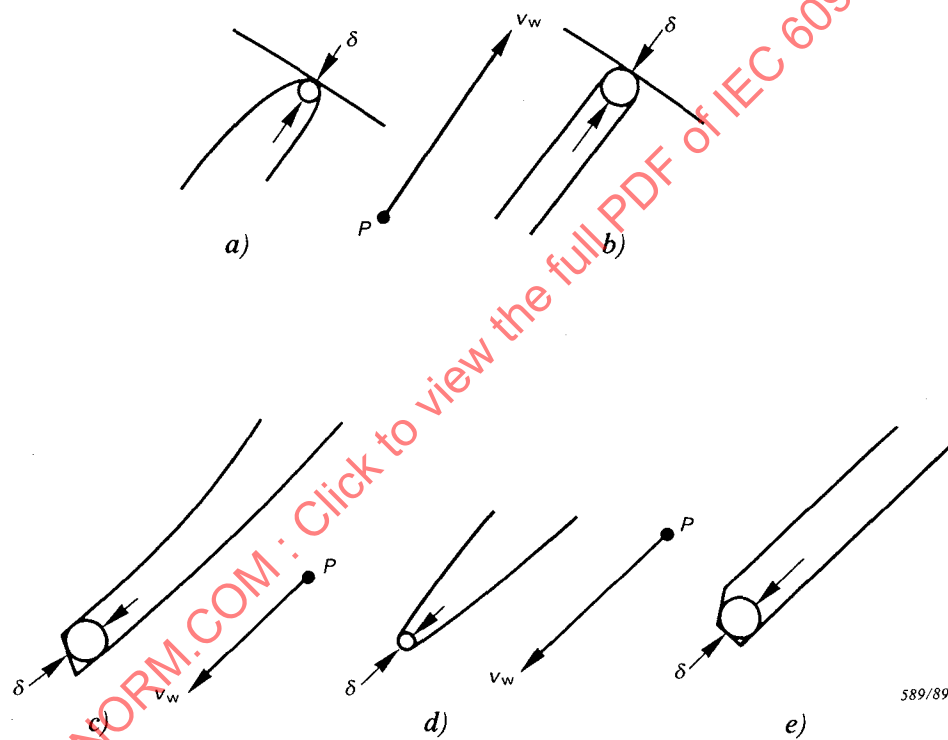
FIG. 2. — Définition de l'épaisseur du bord de fuite d'un profil hydraulique*.

* Ces définitions ne sont qu'une suggestion afin d'évaluer l'ordre de grandeur de la fréquence, en fonction du nombre de Strouhal (voir 6.1.1).



588/89

FIG. 1. — Definition of flow velocity*.



589/89

FIG. 2. — Definition of thickness of trailing edge of a hydraulic profile*.

* These definitions are only a rough suggestion to evaluate the order of magnitude of frequency through the Strouhal number (see 6.1.1).

	Termes	Définitions	Symboles	Unités
2.3.4.6	Fréquence limite inférieure/supérieure du canal de mesure	Fréquence limite inférieure ou supérieure du canal de mesure, pour laquelle l'amplification est réduite de 3 dB par rapport à la partie horizontale de la courbe caractéristique de l'amplification en fonction de la fréquence	f_{lr} f_{ur}	Hz
2.3.4.7	Densité spectrale de puissance	La densité spectrale de puissance d'une grandeur est la moyenne des carrés des valeurs de la partie de cette grandeur qui passe par un filtre à bande étroite, de fréquence centrale f , par unité de largeur de bande, lorsque cette largeur de bande tend vers zéro et le temps, sur lequel est faite la moyenne, vers l'infini	$G(f)$	$[X^2] \cdot s$ où $[X]$ est l'unité de mesure de la grandeur oscillante X
2.3.4.8	Largeur de bande constante relative (en %) d'un analyseur	Rapport: $\beta = \frac{f_1 - f_2}{\sqrt{f_1 \cdot f_2}} \times 100$ où f_1, f_2 sont les valeurs de fréquence pour lesquelles on a une chute de 3 dB par rapport à la courbe caractéristique de l'analyseur	β	%
2.3.4.9	Fréquence de coupure haute du montage d'un capteur de pression	Fréquence maximale pour laquelle l'erreur sur l'amplitude mesurée par le capteur de pression et provoquée par son montage (voir figure D1), ne dépasse pas 3 dB	f_c	Hz
2.3.4.10	Volume de la chambre dans le montage d'un capteur de pression (voir figure D)	Volume de la chambre sur laquelle le capteur de pression est monté	V_c	m ³
2.3.4.11	Aire de la section transversale et longueur du conduit vers le capteur de pression (voir figure D)	Aire de la section transversale et longueur du conduit de raccordement reliant le capteur de pression au conduit hydraulique de la machine	A_c L_c	m ² m
2.3.4.12	Vitesse de propagation d'une onde dans le conduit vers le capteur de pression	Vitesse de propagation des ondes de pression dans le conduit vers le capteur de pression (voir 2.3.4.11)	a_c	m/s
2.3.4.13	Vitesse d'enregistrement	Vitesse du faisceau ou du stylet par rapport au papier de l'enregistreur	v_s	m/s
2.3.4.14	Durée d'enregistrement du signal	Durée d'enregistrement d'un signal émis par un capteur	t_r	s
2.3.4.15	Fréquence de la composante vibratoire	Fréquence de la composante enregistrée à étudier	f_i	Hz
2.3.4.16	Nombre de cycles enregistrés	Nombre de cycles de la composante à enregistrer	N_r	
2.3.4.17	Vitesse de déroulement de la bande ou du papier	Vitesse de déroulement de la bande ou du papier pendant l'enregistrement	v_r	m/s

Note. — D'autres termes et symboles, qui ne figurent pas dans cette liste, seront définis au fil du texte, lorsque cela sera nécessaire.

	Terms	Definitions	Symbols	Units
2.3.4.6	Lower/upper limit frequency of measuring channel	Actual lower/upper limit of frequency of measuring channel, where amplification is reduced by 3 dB with respect to the flat portion of the amplification versus frequency response curve	f_{Lr} f_{Ur}	Hz
2.3.4.7	Power spectral density	The power spectral density is the mean square value of that part of the quantity, passed by a narrow band filter of centre frequency f , per unit bandwidth in the limit as the bandwidth approaches zero and the averaging time approaches infinity	$G(f)$	$[X^2] \cdot s$ where $[X]$ is the unit in which the oscillating quantity X is measured
2.3.4.8	Constant relative (percentage) bandwidth of an analyzer	The ratio $\beta = \frac{f_1 - f_2}{\sqrt{f_1 \cdot f_2}} \times 100$ where f_1, f_2 = frequency values at 3 dB drop points of the analyzer frequency response curve	β	%
2.3.4.9	Upper cut-off frequency of pressure transducer installation	Maximum frequency at which pressure transducer amplitude distortion caused by transducer installation (see Figure D1) does not exceed 3 dB	f_c	Hz
2.3.4.10	Volume of pressure transducer chamber (see Figure D)	Volume of the chamber where the pressure transducer is mounted	V_c	m^3
2.3.4.11	Cross-sectional area and length of the pressure transducer pipe (see Figure D)	Cross-sectional area and length of the connecting pipe connecting the pressure transducer to the water passage of the hydraulic machine	A_c L_c	m^2 m
2.3.4.12	Wave propagation velocity in pressure line	Velocity of propagation of pressure waves in the pressure line (see 2.3.4.11)	a_c	m/s
2.3.4.13	Recording velocity	Velocity of recording beam or pen movement with respect to the recording paper	v_s	m/s
2.3.4.14	Signal recording time	Period of time during which a signal from a transducer is recorded	t_r	s
2.3.4.15	Vibration component frequency	Frequency of recorded component to be investigated	f_i	Hz
2.3.4.16	Number of cycles recorded	Number of component cycles to be recorded	N_r	
2.3.4.17	Tape or paper speed	Tape or paper speed during recording	v_r	m/s

Note. — Other terms and symbols, not listed here, are defined in the text as the necessity arises.

2.4 Classification des machines hydrauliques

Les machines hydrauliques sont classées par type sur la base du futur «Guide pour le vocabulaire des turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines».

La conception des machines hydrauliques et leurs paramètres diffèrent largement. Les machines de différentes conceptions ont été réparties en un certain nombre de classes pour faciliter la comparaison de leurs comportements aux vibrations et fluctuations.

2.4.1 Voici la liste des caractéristiques retenues comme critères de classification*:

— Type de machine hydraulique

Turbines: Pelton, à jet incliné, à flux croisé, Francis, diagonale (Dériaz), hélice, Kaplan, bulbe, tubulaire (à alternateur périphérique), turbine en S.

Pompes: Centrifuges (à un étage, à plusieurs étages), à écoulement diagonal, à écoulement axial.

Pompes-turbines: Francis (à un étage, à plusieurs étages réglables ou non), à écoulement diagonal, à écoulement axial.

— Position de l'arbre (verticale, horizontale, inclinée).

— Nombre et position des paliers.

— Disposition de la machine selon la position du palier de butée: type suspendu, type parapluie avec pivot au niveau de la console palière inférieure, type parapluie avec pivot au niveau du couvercle (fond supérieur), type pivot en partie inférieure de la machine.

2.4.2 En fonction de la position de l'arbre et du nombre et de la position des paliers, les principales classes suivantes sont établies pour les machines hydrauliques (des exemples de disposition sont donnés figure 3).

2.4.2.1 La classe des machines verticales comprend:

- machines suspendues (figure 3a);
- machines de type parapluie (figures 3b et 3c);
- machines avec le palier de butée à la partie inférieure de l'arbre (figure 3d).

2.4.2.2 La classe des machines horizontales comprend:

- machines à deux paliers (figures 3e et 3g);
- machines à trois paliers;
- machines à quatre paliers (figure 3f).

2.4.3 La classe des machines bulbes comprend:

- machines avec la roue et l'alternateur montés en porte à faux (figure 3h);
- machines avec un palier-guide supplémentaire positionné sur le croisillon de sortie (figure 3i).

La figure 3k donne un exemple de machine en S.

* Cette classification ne prétend pas à l'exhaustivité, mais entend seulement couvrir les types les plus répandus; les figures jointes ne sont que des schémas indicatifs, en vue d'avoir une référence facile avec la liste des différentes dispositions (voir page 28).

2.4 Classification of hydraulic machines

Hydraulic machines are classified into their types on the basis of the future “Guide for the Nomenclature of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines”.

Designs of hydraulic machines and their parameters are highly different. To facilitate the comparison of vibrations and pulsations of different machines the various designs are subdivided into a number of different classes.

2.4.1 The following features are used as the basis for classification*:

— Type of hydraulic machine

Turbines: Pelton, inclined jet, cross flow, Francis, diagonal flow (Deriaz), propeller, Kaplan, bulb, rim-generator (straight-flow), S-type.

Pumps: centrifugal (single stage, multistage), diagonal flow, axial flow.

Pump turbines: Francis (single stage, multistage not regulated and regulated), diagonal flow, axial flow.

— Arrangement of the shaft (vertical, horizontal, inclined).

— Number and position of bearings.

— Arrangement of the machines: suspended type, umbrella type supported on the lower bearing bracket, umbrella type supported on the head cover, thrust bearing at lower end of the machine in relation to the position of the thrust bearing.

2.4.2 As a function of the arrangement of the shaft and of the number and position of bearings the following principal classes of hydraulic machines are formed (some examples of arrangements are shown in Figure 3).

2.4.2.1 The class of vertical machines includes:

- suspended machines (Figure 3a)
- umbrella type machines (Figures 3b and 3c)
- machines with the thrust bearing at the lower end of the shaft (Figure 3d).

2.4.2.2 The class of horizontal machines includes:

- machines with two bearings (Figures 3e and 3g)
- machines with three bearings
- machines with four bearings (Figure 3f).

2.4.3 The class of bulb machines includes:

- machines with cantilever arrangement of runner and generator (Figure 3h);
- machines with additional radial support located on an outlet stayring (Figure 3i).

Figure 3k gives an example of S-type machines.

* This classification is not intended to be exhaustive, but to cover only the more widely used types; besides, the figures are intended only as indicative schemes for easy reference to the list of arrangements and parts on page 29.

La description générale des croquis ainsi qu'une liste des numéros utilisés pour identifier les parties principales de chaque disposition sont données ci-dessous.

- Figure 3a: machine verticale suspendue.
- Figure 3b: machine verticale du type parapluie.
- Figure 3c: machine verticale du type parapluie.
- Figure 3d: machine verticale supportée à l'extrémité inférieure de l'arbre.
- Figure 3e: machine horizontale à deux paliers.
- Figure 3f: machine horizontale à quatre paliers.
- Figure 3g: couple de machines horizontales à deux paliers.
- Figure 3h: machine bulbe montée en porte à faux.
- Figure 3i: machine bulbe avec un palier-guide supplémentaire.
- Figure 3k: machine en S.

Liste des organes et leurs numéros de référence:

- 1 Roue.
- 2 Arbre.
- 3 Alternateur/moteur.
- 4 Couvercle (fond supérieur).
- 5 Console palière inférieure.
- 6 Console palière supérieure.
- 7 Support palier de butée.
- 8 Palier-guide turbine (pompe/pompe-turbine).
- 9 Palier-guide alternateur/moteur.
- 10 Palier de butée.
- 11 Palier-guide et de butée combiné.
- 12 Accouplement.
- 13 Réducteur/multiplicateur.

FIG. 3 — Quelques dispositions de machines hydrauliques. (Voir pages suivantes.)

The general description of the figures and a list of the numbers used for the identification of the main parts within the arrangements is summarized in the following.

- Figure 3a: vertical suspended machine.
- Figure 3b: vertical umbrella-type machine.
- Figure 3c: vertical umbrella-type machine.
- Figure 3d: vertical machine supported at the lower end shaft.
- Figure 3e: horizontal machine with two bearings.
- Figure 3f: horizontal machine with four bearings.
- Figure 3g: pair of horizontal machines with two bearings.
- Figure 3h: bulb machine with cantilever arrangement.
- Figure 3i: bulb machine with additional radial bearing.
- Figure 3k: S-type machine.

List of parts and reference numbers:

- 1 Runner/impeller.
- 2 Shaft.
- 3 Generator/motor.
- 4 Head cover.
- 5 Lower bearing bracket.
- 6 Upper bearing bracket.
- 7 Thrust bearing support.
- 8 Turbine (pump/pump-turbine) guide bearing.
- 9 Generator/motor guide bearing.
- 10 Thrust bearing.
- 11 Guide and thrust bearing combined.
- 12 Coupling.
- 13 Gear box.

FIG. 3. — Some arrangements of hydraulic machines. (See following pages.)

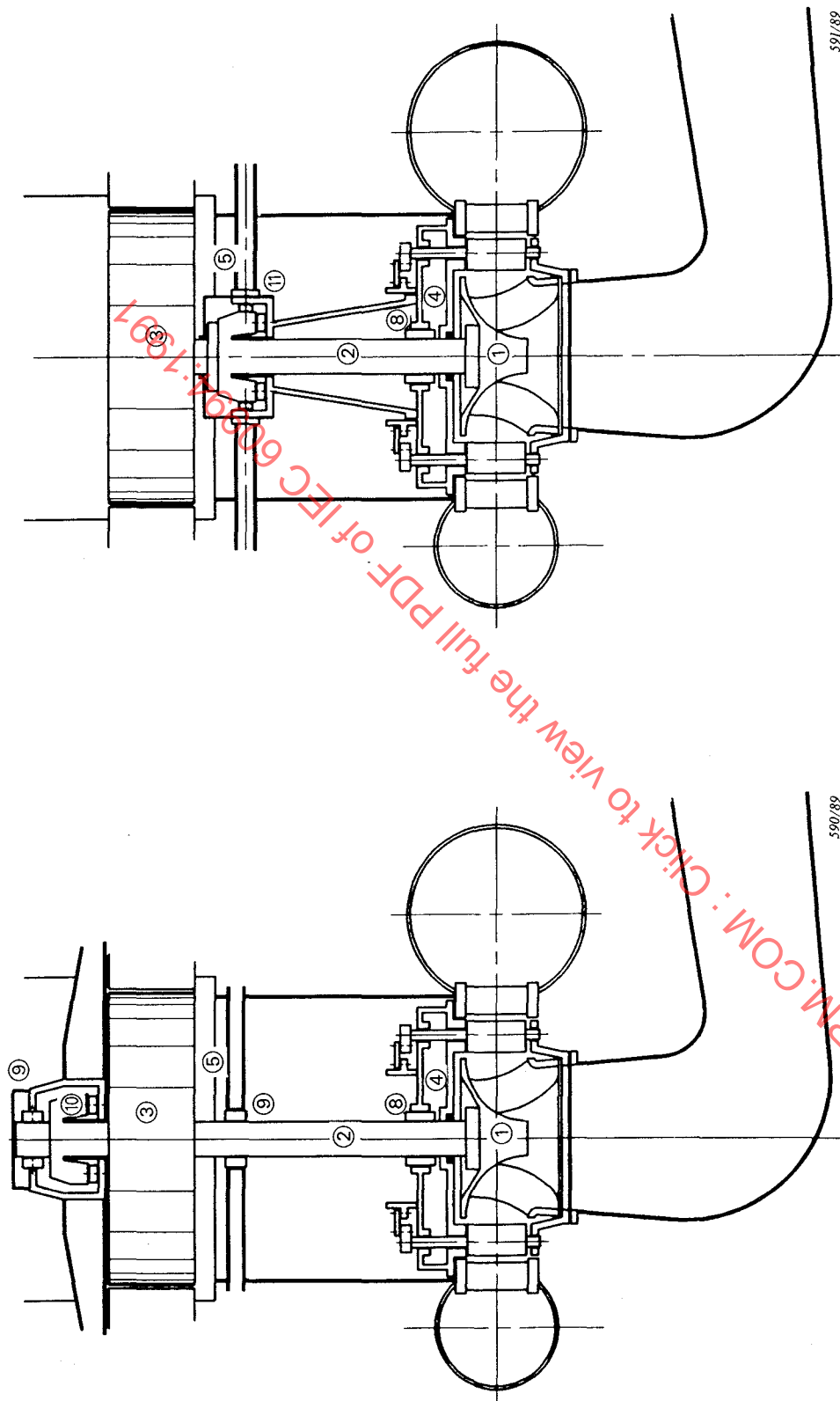
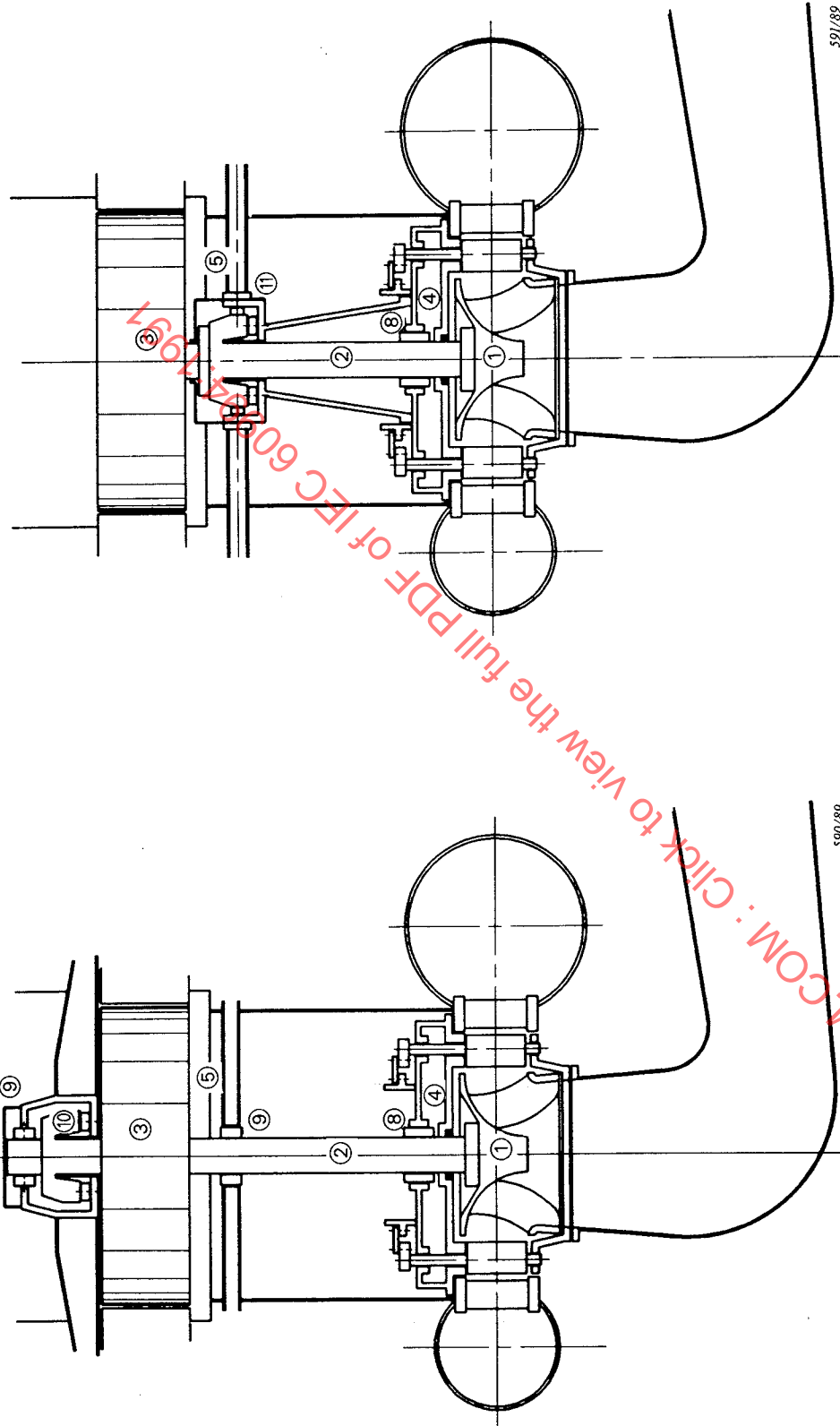


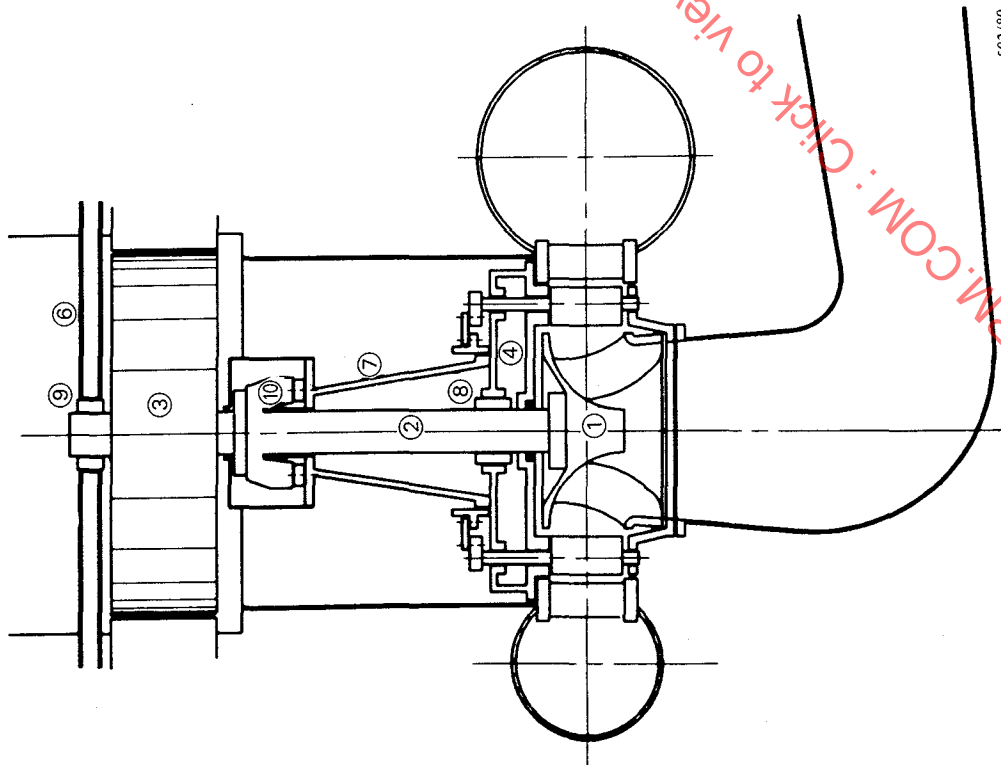
FIG. 3a. — Exemple d'une machine verticale suspendue (turbine Francis) à trois paliers-guides.

FIG. 3b. — Exemple d'une machine verticale (turbine Francis) du type parapluie avec butée sur le fond supérieur, et alternateur en porte à faux.

(Pour la liste des numéros de référence, voir description générale de la figure 3, page 28)

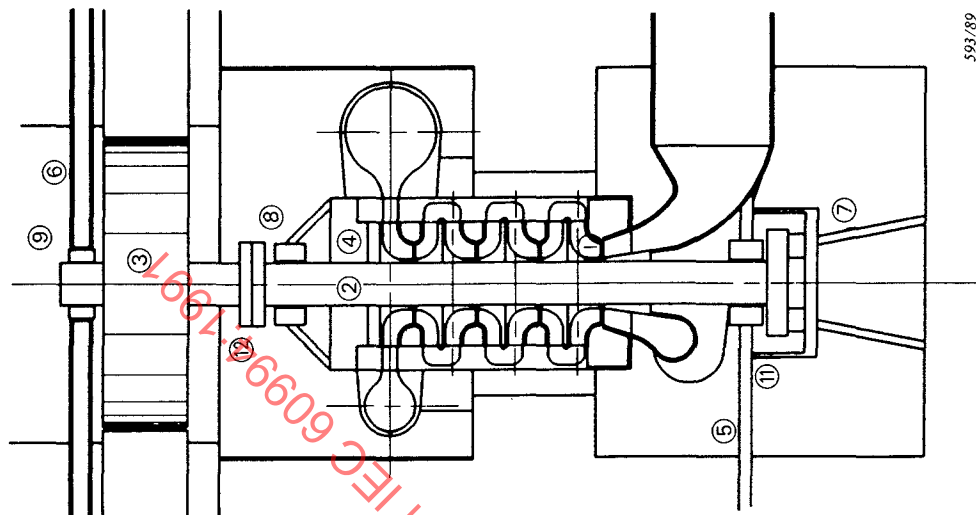


(List of reference numbers, see general description of Figure 3, page 29)



592/89

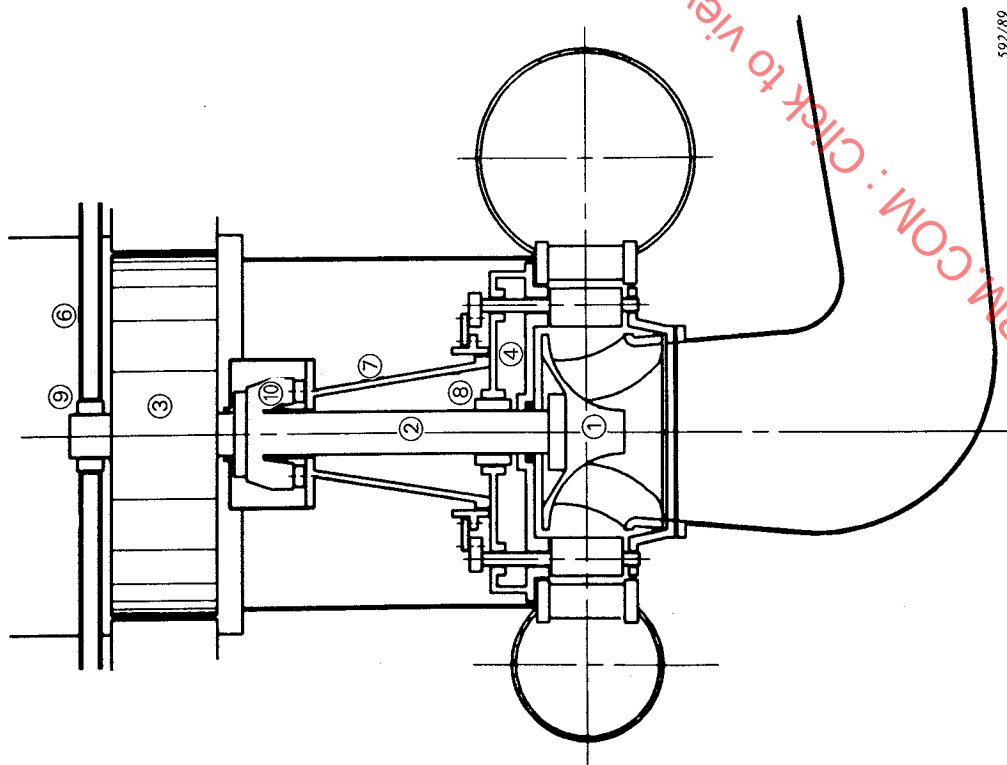
FIG. 3c. — Exemple d'une machine verticale (turbine Francis) du type parapluie, avec la butée sur le fond supérieur, et deux paliers-guides.



593/89

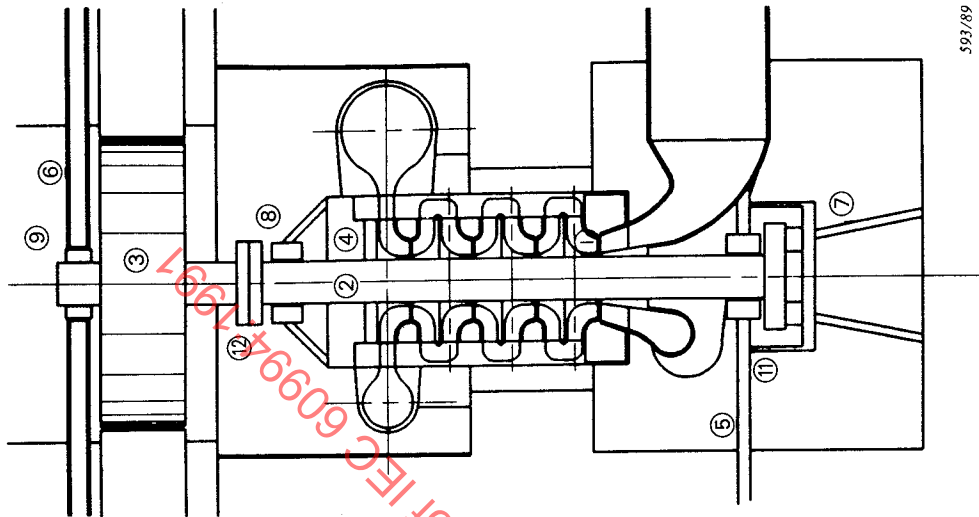
FIG. 3d. — Exemple de machine verticale (pompe à 4 étages), avec la butée à l'extrémité inférieure de l'arbre et trois paliers-guides.

(Pour la liste des numéros de référence, voir description générale de la figure 3)



592/89

FIG. 3c. — Example of a vertical machine (Francis turbine) of umbrella-type with the thrust bearing on the head cover and two guide bearings.



593/89

FIG. 3d. — Example of a vertical machine (four-stage storage pump) with the thrust bearing at the lower end of the shaft and three guide bearings.

(List of reference numbers: see general description of Figure 3)

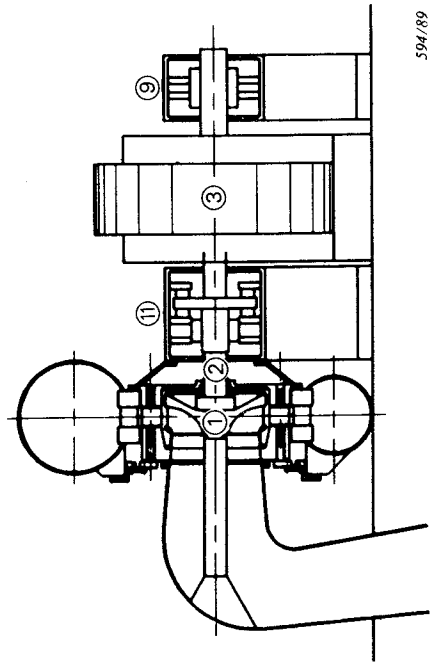


FIG. 3e. — Exemple de machine horizontale (turbine Francis) à deux paliers.

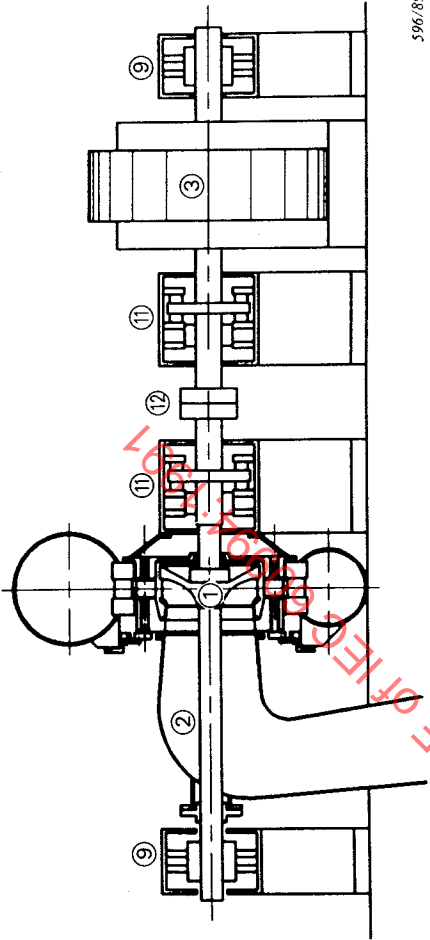


FIG. 3f. — Exemple de machine horizontale (turbine Francis) à quatre paliers.

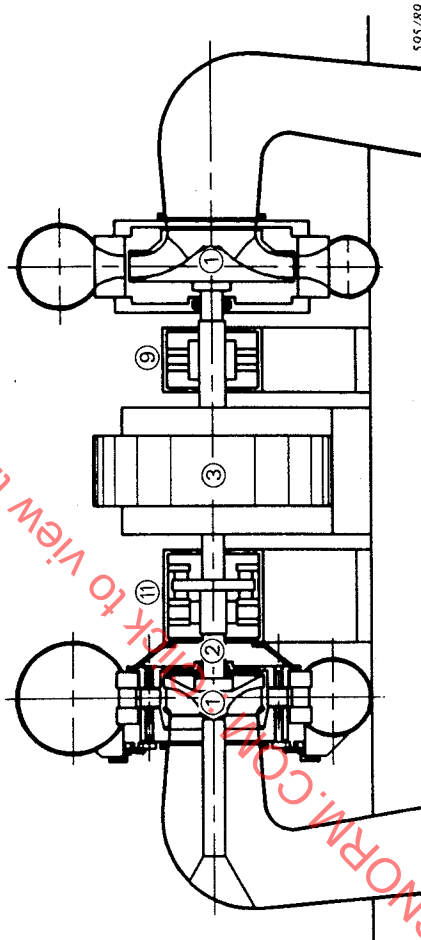
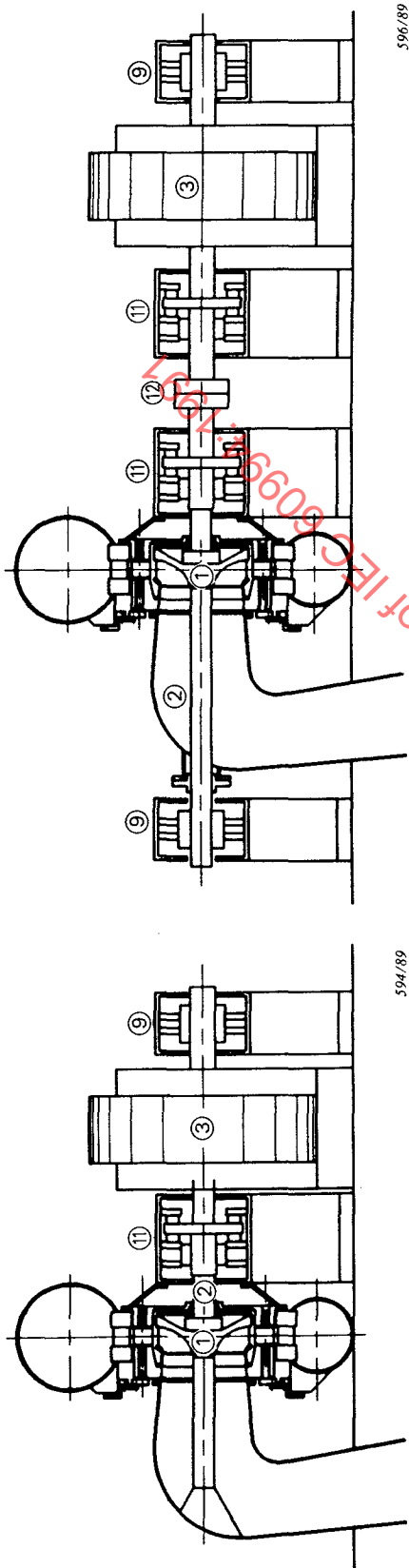


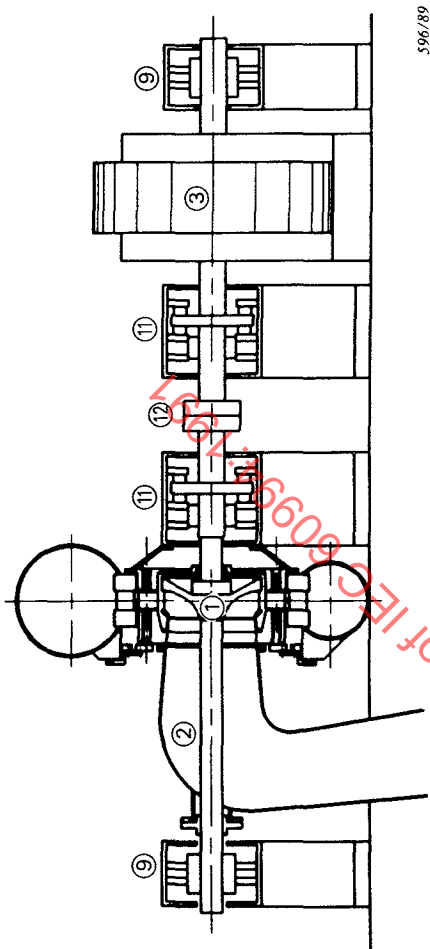
FIG. 3g. — Exemple de machine horizontale à deux paliers; une turbine Francis à gauche et une pompe mono-étage à droite.

(Pour la liste des numéros de référence, voir description générale de la figure 3)



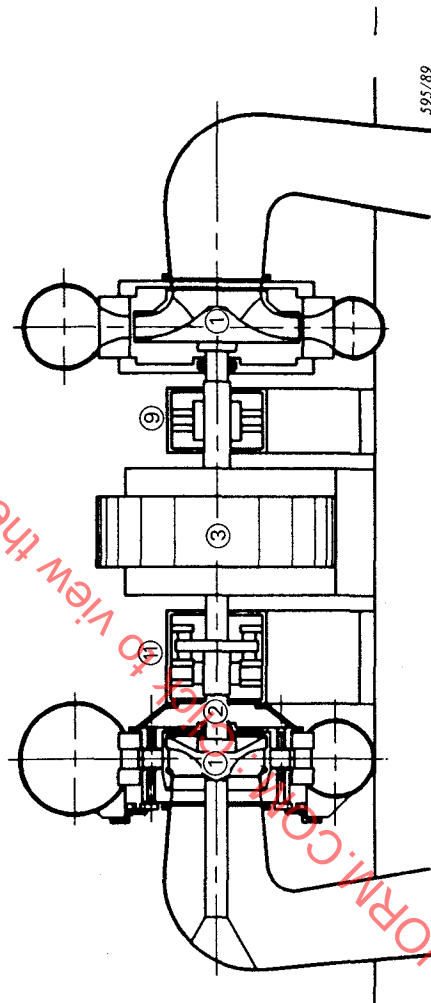
594/89

FIG. 3e. — Example of a horizontal machine (Francis turbine) with two bearings.



596/89

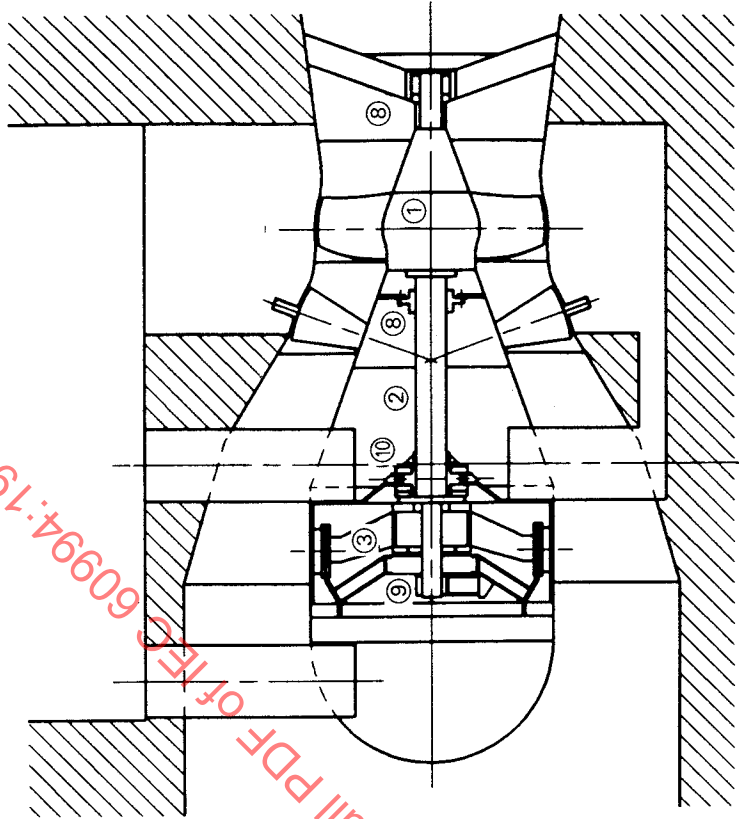
FIG. 3f. — Example of a horizontal machine (Francis turbine) with four bearings.



595/89

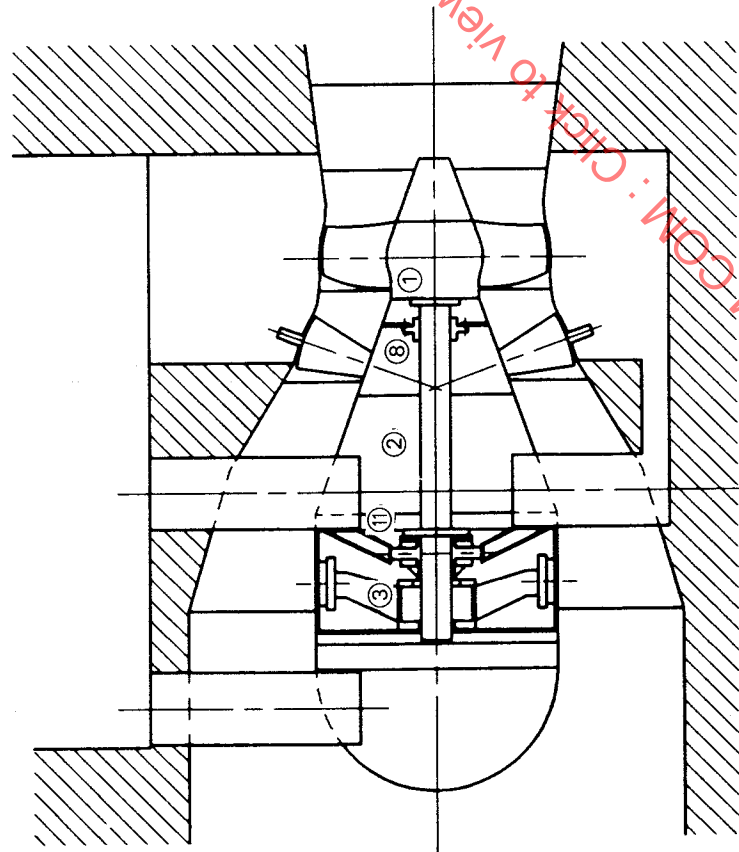
FIG. 3g. — Example of a horizontal machine with two bearings, a Francis turbine on the left and a single stage pump on the right side.

(List of reference numbers: see general description of Figure 3)



598/89

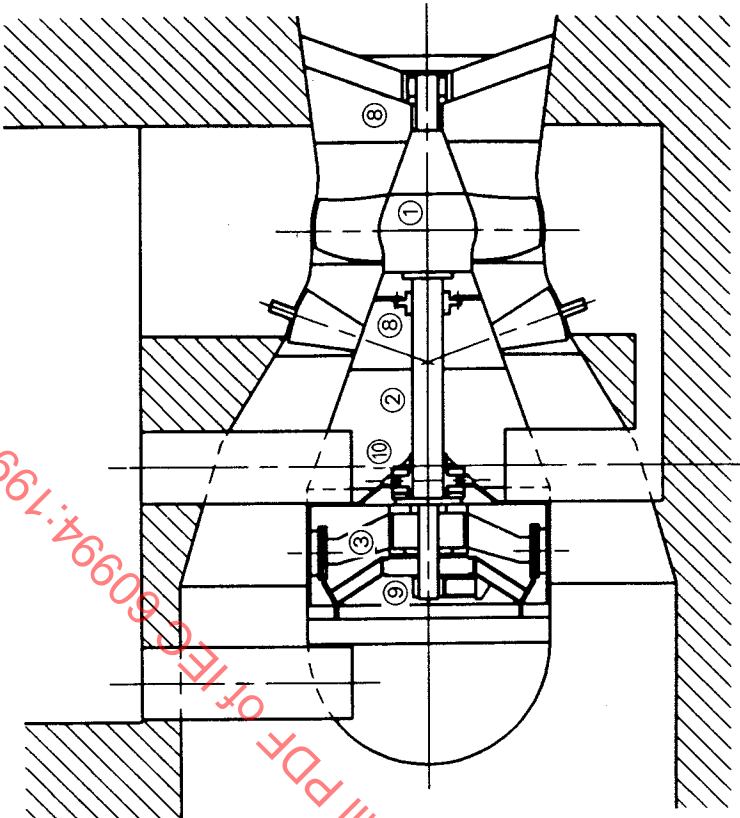
FIG. 3i. — Exemple de machine bulbe comportant un palier-guide supplémentaire positionné sur le croisillon de sortie.



597/89

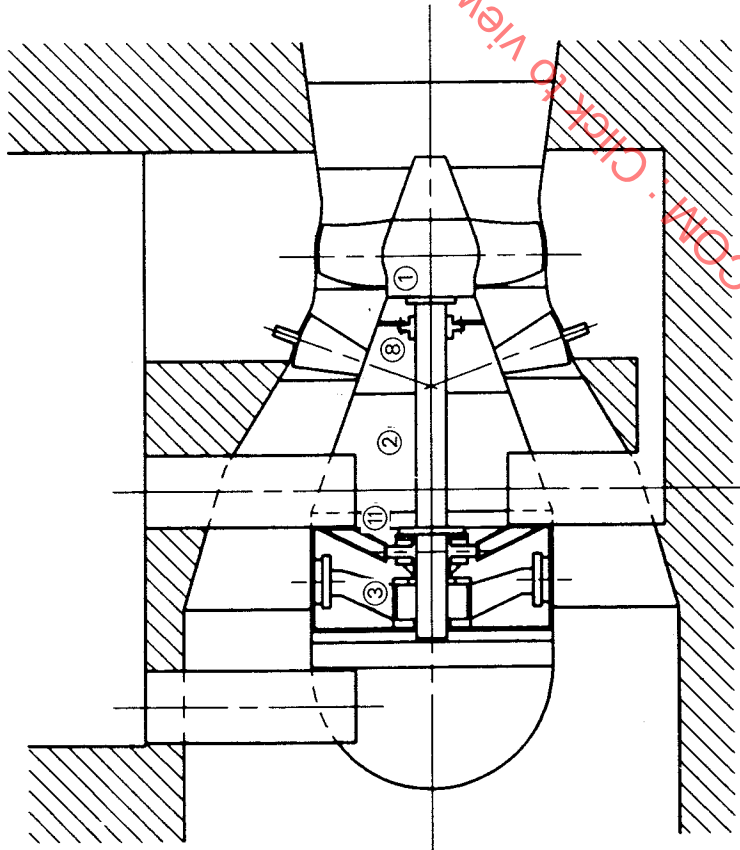
FIG. 3h. — Exemple de machine bulbe avec roue et alternateur montés en porte à faux.

(Pour la liste des numéros de référence, voir description générale de la figure 3)



598/89

FIG. 3*i*. — Example of a bulb machine with an additional radial bearing located on the outlet staying.



597/89

FIG. 3*h*. — Example of a bulb machine with a cantilever arrangement of the runner and generator.

(List of reference numbers: see general description of Figure 3)

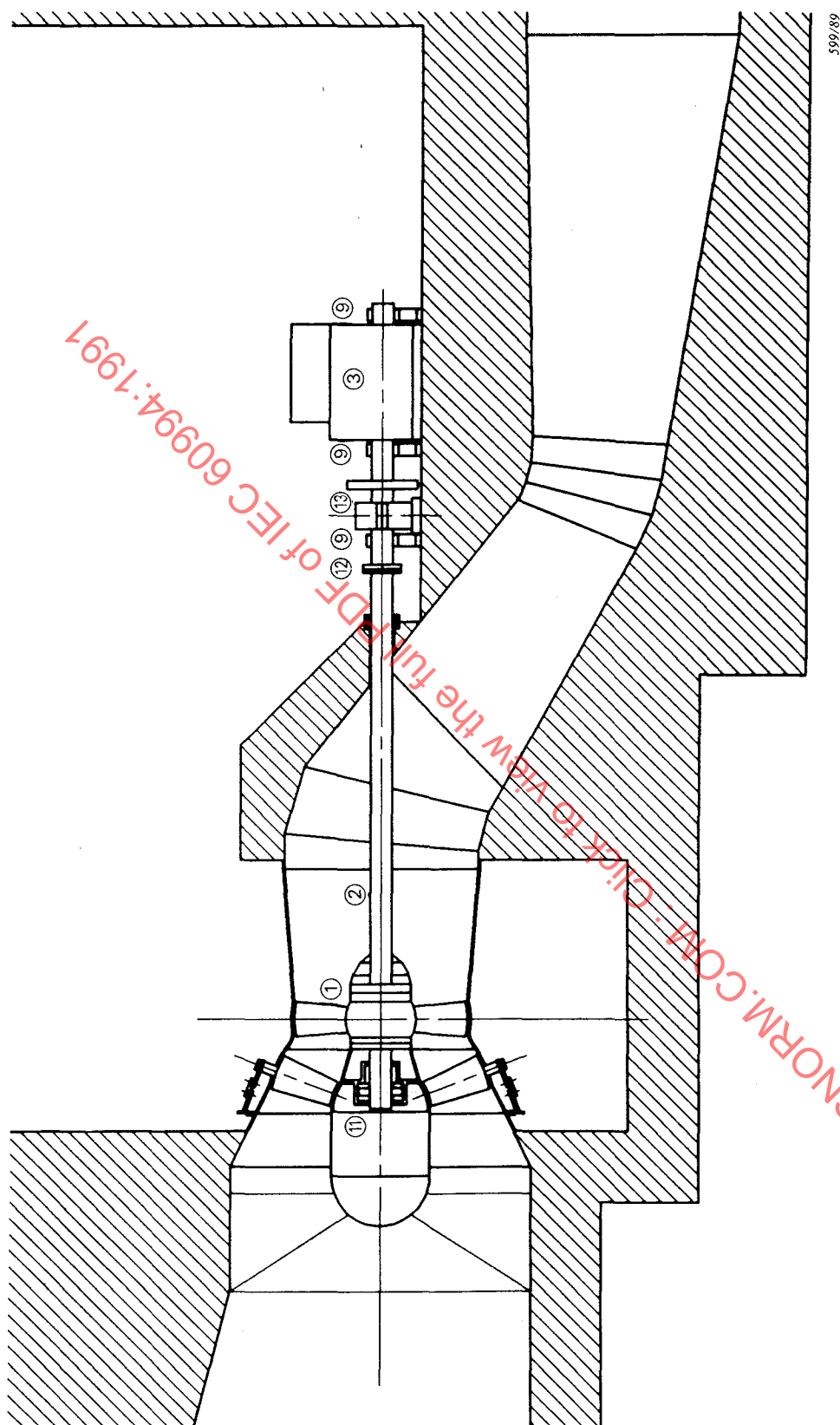
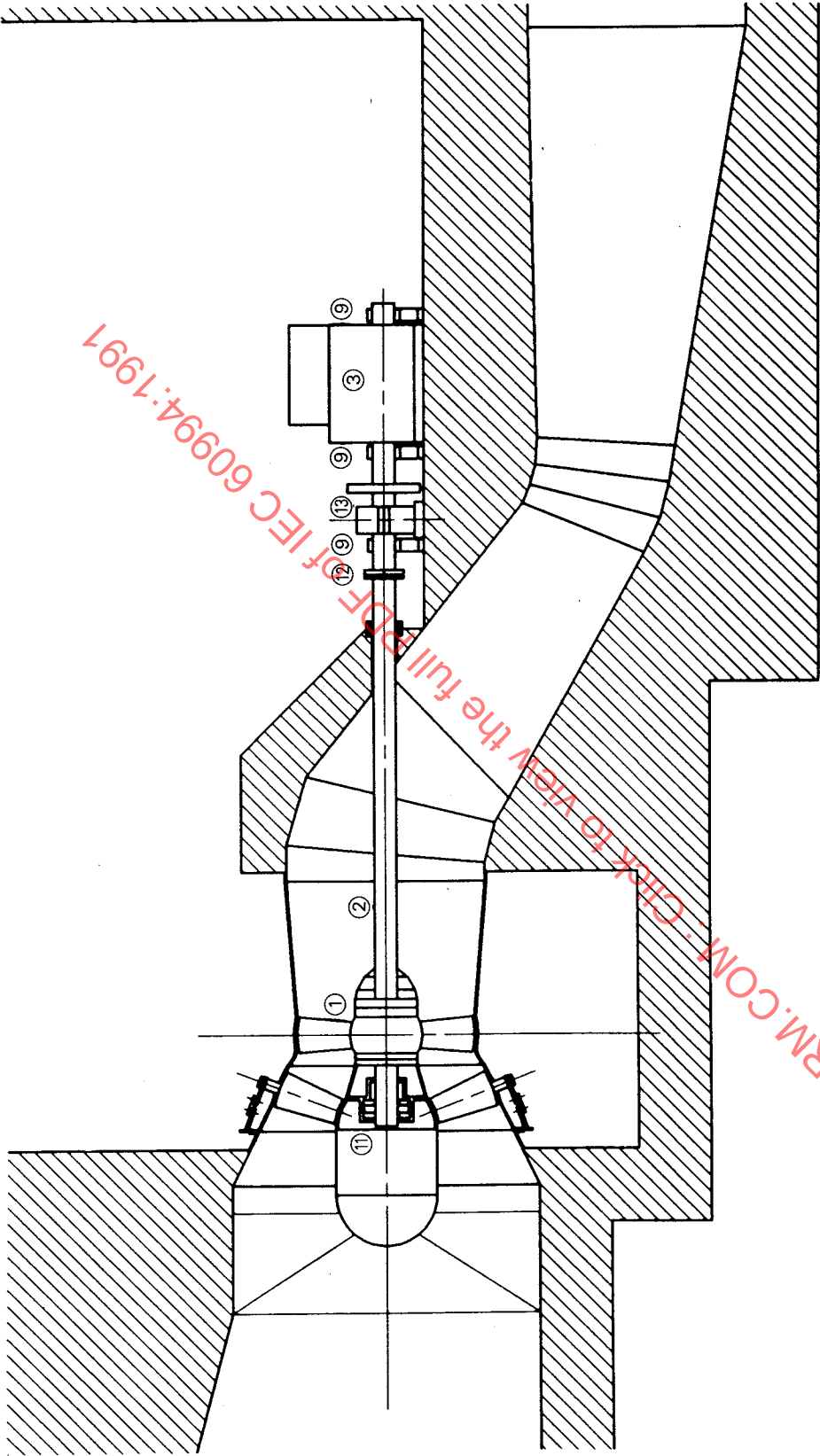


FIG. 3k. — Exemple de machine en S.

(Pour la liste des numéros de référence, voir description générale de la figure 3)



590/89

FIG. 3k. — Example of an S-type machine.

(List of reference numbers: see general description of Figure 3)

3. Garanties

Les garanties, quelles qu'elles soient, ne font pas partie de ce guide. Les données disponibles à ce jour ne suffisent pas à déterminer des garanties effectivement fondées sur l'amplitude maximale des vibrations et fluctuations des machines hydrauliques.

L'évaluation statistique des résultats d'essais réalisés conformément à ce guide permettra, à l'avenir, de déterminer des classes de qualité.

Toutefois, si des garanties sont données dans des cas particuliers, elles devront être vérifiées par la méthode de mesure définie dans ce guide*.

SECTION DEUX — EXÉCUTION DES ESSAIS

4. Conditions à remplir pour l'essai

4.1 Conditions de fonctionnement dans lesquelles sont réalisées les mesures

Les conditions de fonctionnement dans lesquelles sont réalisées les mesures varient selon les circonstances locales, le matériel et les objectifs qu'on se propose; elles sont fixées suivant les accords entre les parties.

4.1.1 Les conditions d'exploitation énumérées ci-dessous ne constituent qu'un exemple des conditions intéressantes pour lesquelles les essais de vibrations et de fluctuations sont à effectuer:

- a) Machine non couplée et augmentation par paliers de la vitesse jusqu'à la vitesse spécifiée, ou, si nécessaire, jusqu'à la survitesse transitoire maximale.
- b) Machine en régime stabilisé et à charge croissante, sous énergies hydrauliques massiques minimale, moyenne et maximale si nécessaire.
- c) Transitoires (démarrages, arrêts, variations de charge, déclenchements, etc.).
- d) Machine tournant à sa vitesse spécifiée, non couplée au réseau, alternativement excitée ou non, afin de déterminer si les vibrations sont dues à un déséquilibre mécanique ou électrique; et également afin de déterminer si les vibrations de l'alternateur influent sur le fonctionnement de la turbine**.

Des essais appropriés seront exécutés, si possible, pour tous les principaux modes dans lesquels la machine sera appelée à fonctionner.

Si plusieurs machines sont installées dans le même aménagement ou système, il convient qu'elles soient essayées (synchronisées) individuellement ou ensemble (deux ou plusieurs turbines) afin d'indiquer la possibilité d'interférence (hydraulique ou électrique).

4.1.2 Les vibrations et fluctuations des machines hydrauliques ne seront mesurées que si l'énergie hydraulique massique, le débit et le NPSE (énergie massique nette à l'aspiration) sont compris dans les limites spécifiées. Des combinaisons différentes de ces paramètres influencent les vibrations et fluctuations de la machine.

4.1.3 Si une admission ou injection d'air dans le conduit hydraulique est prévue pour une machine, toutes les conditions nécessitant cette admission ou injection d'air devront figurer dans les conditions d'exploitation à étudier. Dans ce cas, il conviendra de mesurer, si cela est possible, la quantité d'air admis ou injecté.

* On pourra entre-temps, et dans le cas d'un fonctionnement stabilisé, se reporter à l'ISO 3945 (article 8, table), en ayant soin de vérifier que cette norme peut être appliquée au cas considéré.

** Les exemples a), b), c) et d) se rapportent au fonctionnement en turbine; des conditions analogues peuvent être définies pour le fonctionnement en pompe.

3. Guarantees

Guarantees, of whatever nature, do not form part of this guide. The data available at present are not sufficient to determine guarantees actually based on the maximum extent of vibrations and pulsations of hydraulic machines.

In the future it will be possible to determine these quality ranges by statistical evaluation of the results of tests carried out according to this guide.

Nevertheless, if guarantees are given in special cases, they shall refer to this guide as far as measurement procedure is concerned*.

SECTION TWO — EXECUTION OF TESTS

4. Test conditions to be fulfilled

4.1 *Operating conditions under which measurements are performed*

Operating conditions under which measurements are performed depend on the local conditions, the machine, the intended objectives and are fixed by mutual agreement.

4.1.1 The operating conditions listed below are only an example of conditions of interest under which vibration and pulsation tests may be performed:

- a) Machine at no-load and speed increasing step-by-step up to specified speed or, if needed, maximum momentary overspeed.
- b) Machine in steady state regime under increasing load and/or under minimum/medium specific hydraulic energy and maximum specific hydraulic energy if necessary.
- c) Transients (start-ups, shut-downs, load changes, load rejections, etc.).
- d) Machine operating at specified speed, not connected to the system, excitation field switched on and off, to determine if vibration is due to mechanical or electrical unbalance; also and if the generator vibration is influencing the turbine operation**.

Appropriate tests will be performed, if possible, for all the operating modes of importance in which the machine will be required to work.

If several machines are installed in the same powerhouse or system, the machines should be tested (synchronized) separately and together (two or more turbines) to indicate the possibility of interference (hydraulic or electric).

4.1.2 Vibrations and pulsations of the hydraulic machines shall be measured when specific hydraulic energy, discharge and NPSE (net positive suction specific energy) are within the specified limits. Different combinations of these parameters influence the vibrations and pulsations in the machine.

4.1.3 If air admission/injection to the machine water passages is provided for a machine, all the conditions involving air admission/injection shall be included in the operating conditions to be investigated. In this case the admitted/injected air quantity should be measured if possible.

* In the meantime, reference could be made, for steady-state operation, to ISO 3945 (clause 8, table), with due caution as regards the applicability of the said standard to the specific case under consideration.

** Examples a), b), c) and d) are intended for turbine operation; similar conditions may be defined for pump operation.

- 4.1.4 Les essais particulièrement délicats (tels que vitesse d'emballlement stabilisée, passage direct du fonctionnement en pompe à survitesse transitoire maximale avec vannage bloqué) ne seront pas réalisés à la seule fin d'obtenir des informations sur les vibrations ou fluctuations; si cependant ils sont réalisés, l'exploitant, le constructeur et le responsable de l'essai conviendront avant les essais de clauses particulières couvrant les risques.

4.2 *Vérification sur la machine avant le début des essais*

Tout essai de vibration porte sur un ou plusieurs points de fonctionnement de la machine, identifiés par certaines graduations et certains affichages (ouverture du vannage, angle d'inclinaison des pales, etc.). Il y a lieu de garder présent à l'esprit que les indications fournies par ces graduations et affichages ne sont pas toujours exactes. Il convient donc de procéder, si possible, à une inspection avant essais (en vidangeant la machine), ou de se référer (si possible) au compte rendu d'une inspection récente (effectuée dans les six derniers mois au plus, par exemple). Cette inspection doit aussi servir à s'assurer de l'emplacement précis des prises de pression et des capteurs ainsi que de leur bon état.

En l'absence de ces possibilités, il est recommandé que les parties intéressées s'accordent sur la signification des indications des graduations et des affichages, et sur les incertitudes de lecture qui les concernent.

5. **Procédure d'essai**

5.1 *Paramètres déterminant le point de fonctionnement*

5.1.1 *Mesures en régime stabilisé*

Il y a lieu que ces mesures soient effectuées en maintenant constants, tout au long des essais, tous les paramètres de fonctionnement comme l'ouverture du distributeur ou des injecteurs pour une turbine ou pompe-turbine réglable, la position de la vanne pour une pompe ou pompe-turbine non réglable, la puissance, la vitesse de rotation et l'énergie hydraulique massique. Toutefois, dans certaines installations à petits réservoirs, il n'est pas possible de maintenir constante cette énergie hydraulique massique. Dans ces cas, une faible variation d'énergie hydraulique massique est admise, à condition qu'elle n'excède pas $\pm 3\%$ de l'énergie hydraulique massique spécifiée.

- 5.1.1.1 La puissance de la machine doit être mesurée par les instruments du tableau de commande, dont l'exactitude aura été préalablement vérifiée. Si une plus grande précision est requise, une instrumentation particulière peut être utilisée conformément aux codes CEI.

- 5.1.1.2 La précision du dispositif de mesure de la vitesse (tachymètre ou compteur d'impulsions) devrait permettre de déterminer les vitesses réelles en régime stabilisé avec une marge d'incertitude ne dépassant pas $\pm 1\%$ de la vitesse spécifiée (si possible).

Une impulsion à chaque tour (repère de rotation) doit impérativement être disponible pour déterminer la phase des phénomènes vibratoires par rapport à un plan radial déterminé de la partie tournante.

- 5.1.1.3 L'énergie hydraulique massique peut être évaluée par la mesure des niveaux d'eau en amont et dans le canal de fuite. Si la mesure des niveaux ne permet pas d'obtenir la valeur de l'énergie hydraulique massique avec une précision suffisante, des prises de pression supplémentaires devront être placées aux sections de mesure haute et basse pression de la machine, à partir desquelles on pourra obtenir l'énergie hydraulique massique, ainsi que la mesure du NPSE, conformément aux codes CEI.

- 4.1.4 Particularly severe tests (such as steady-state runaway speed, load change from pumping to maximum momentary overspeed with blocked wicket-gates) should not be carried out for the sole purpose of gathering information on vibrations or pulsations; if they are performed at all, then special agreements covering the risks should be taken between owner, manufacturer and test organizers prior to test performance.

4.2 *Checks on the machine before the beginning of tests*

Every vibration test is referred to one or more operating points of the machine, identified by certain scales and readings (gate openings, blade angles etc.). It should be kept in mind that sometimes the indications given by these scales and readings may not be accurate. Therefore, if at all possible, an inspection (with dewatering of the water passages) should be made prior to the tests, or reference should be made (if available) to a recent inspection (e.g. not older than six months). This inspection should also serve the purpose of checking the exact positions and the good condition of the transducers and pressure taps.

In the absence of these possibilities, agreements as to the meaning and inaccuracies of scales and readings should be reached among the interested parties.

5. **Test procedure**

5.1 *Parameters determining the operating point*

5.1.1 *Measurements under steady-state condition*

These measurements should be performed with all the operating parameters — such as: guide-vane or needle opening for a regulated turbine or pump-turbine, valve position for a non-regulated pump or pump-turbine, power, rotational speed and specific hydraulic energy — kept constant during the test. However, in certain small reservoir installations the specific hydraulic energy (head) cannot be kept constant. In these cases a low variation in specific hydraulic energy can be allowed, provided it does not exceed $\pm 3\%$ of the specified specific hydraulic energy.

- 5.1.1.1 The power of the machine shall be measured with panel measuring instruments. Their accuracy should have been previously checked. If higher accuracy is desired, ad hoc instrumentation may be used in accordance with IEC codes.

- 5.1.1.2 The accuracy of the speed measuring device (calibrated tachometer or impulse counter) should allow the determination of actual speeds under steady-state conditions with an uncertainty of not more than $\pm 1\%$ of specified speed (if possible).

A rotational impulse (revolution mark) must be available to determine the phase of vibratory phenomena with respect to a definite radial plane of the rotating part.

- 5.1.1.3 The specific hydraulic energy can be evaluated by the measurement of the headwater and tailwater levels. If the measurement of these levels does not supply the specific hydraulic energy value with sufficient accuracy, additional pressure taps have to be placed at the machine high and low pressure reference sections from which the specific hydraulic energy as well as the test NPSE can be obtained in accordance with IEC codes.

- 5.1.1.4 L'ouverture du distributeur (ou des injecteurs) doit être déterminée par lecture de l'indicateur d'ouverture du distributeur (ou des injecteurs) et éventuellement à partir de la course du servomoteur, avec une précision de $\pm 1\%$ de l'ouverture totale.
- 5.1.1.5 Dans le cas de roue à pales réglables, l'angle des pales devrait être mesuré de préférence directement. Si cela ne peut pas être effectué, l'angle devrait être obtenu d'une composante accouplée directement aux pales, telle que servomoteur des pales ou tige de connexion. Le résultat devrait avoir une précision de $\pm 1\%$ de la pleine course du servomoteur ou supérieure.
- 5.1.1.6 Dans les cas particuliers où le réglage se fait par une vanne principale à l'entrée (ou à la sortie) (par exemple machines réversibles à plusieurs étages non réglables en marche à vide), l'ouverture de la vanne devrait être déterminée avec une précision de $\pm 0,5\%$ de la pleine course du servomoteur (si possible).
- 5.1.1.7 En plus de tous les paramètres déjà mentionnés, tous les autres ayant une importance dans la description des conditions de fonctionnement seront mesurés (température des paliers, de l'eau, par exemple).

5.1.2 Mesures en régime transitoire

Dans les cas ordinaires de régime transitoire (démarrage, arrêt, variation de charge, déclenchement en turbine et en pompe), il convient d'enregistrer tous les paramètres pertinents en vue d'une analyse détaillée. En d'autres termes, il ne s'agit pas seulement d'enregistrer les paramètres relatifs aux vibrations ou aux fluctuations, mais aussi tous ceux qui sont nécessaires à la description du régime transitoire comme la vitesse de rotation, l'énergie hydraulique massique, l'ouverture du distributeur (ou des injecteurs), l'ouverture de la vanne dans certains cas, etc.

Il faut, en particulier, tenir compte des points suivants:

- 5.1.2.1 La puissance de la machine doit être mesurée avec des capteurs de puissance appropriés et capables de fournir un signal proportionnel à la puissance.
- 5.1.2.2 La vitesse de rotation doit être mesurée avec des capteurs appropriés (dynamo tachymétrique par exemple) capables de fournir un signal proportionnel à la vitesse instantanée compatible avec l'enregistrement. Il y a lieu que la mesure s'effectue avec une marge d'incertitude ne dépassant pas $\pm 1\%$ de la vitesse synchrone (si possible).
- 5.1.2.3 L'énergie hydraulique massique et le NPSE doivent être déterminés par mesure de la pression instantanée côtés haute et basse pression, en utilisant des capteurs de pression appropriés, reliés aux prises de pression de référence*.
- 5.1.2.4 L'ouverture du distributeur (des injecteurs) doit être mesurée au moyen de capteurs appropriés reliés aux parties mobiles du servomoteur ou au tourillon d'une directrice.
- 5.1.2.5 Dans le cas d'une roue à pales réglables, l'angle des pales doit être mesuré avec des capteurs spéciaux reliés à la tige de commande de ces pales. Si cela n'est pas possible, les capteurs seront reliés à l'indicateur de position.
- 5.1.2.6 On peut, si nécessaire, mesurer également l'ouverture des différentes vannes et robinets avec des capteurs appropriés.

* Pour obtenir l'énergie hydraulique massique, il faut aussi connaître le terme cinétique. Une mesure directe étant généralement impossible, une évaluation d'un tel terme peut être réalisée si les valeurs du débit instantané sont approximativement connues. L'erreur ainsi introduite est généralement faible, car très souvent le terme cinétique est faible devant l'énergie hydraulique massique.

- 5.1.1.4 The guide vane (or needle) opening shall be determined from the readings of the distributor (or nozzle) opening scale and/or from the servomotor stroke, with an accuracy of $\pm 1\%$ of full opening.
- 5.1.1.5 In the case of a runner with movable blades, the blade angle should preferably be measured directly. If this cannot be done, the angle should be derived from a component directly coupled to the blades, such as a blade servomotor or a connecting rod. The result should be accurate to $\pm 1\%$ of full servomotor stroke or better.
- 5.1.1.6 For those special cases in which flow regulation is achieved by a main inlet (or outlet) valve (e.g. for non-regulated multistage reversible machines at no-load), the valve opening should be determined with an accuracy of $\pm 0,5\%$ of full servomotor stroke (if possible).
- 5.1.1.7 In addition to the parameters already mentioned, all others which may be of importance to define the operating point have to be measured (e.g. bearing temperature, water temperature).

5.1.2 *Measurements during transient operation*

In normal cases for transient processes (e.g. start-up, shut-down, load change, load rejection in turbine operation, power failure in pump operation, etc.) the relevant parameters should be recorded for a thorough analysis. That means that this not only includes the desired vibration or pulsation parameters but also all parameters (e.g. rotational speed, specific hydraulic energy, guide vane or needle opening, valve opening in certain cases, etc.) necessary to describe the transient operation.

In particular the following must be taken into account:

- 5.1.2.1 The power of the machine shall be measured by suitable power transducers capable of supplying a signal proportional to the power.
- 5.1.2.2 The rotational speed shall be measured by means of suitable transducers (such as tachometer dynamos) capable of supplying a signal proportional to the instantaneous speed useful for the recording. The measurement should be performed with a measurement uncertainty not higher than $\pm 1\%$ of the specified speed (if possible).
- 5.1.2.3 The specific hydraulic energy and the NPSE shall be determined by the measurement of the high-pressure and low-pressure side instantaneous pressure, using suitable pressure transducers connected to the reference pressure taps*.
- 5.1.2.4 The guide vane (needle) opening shall be measured by suitable transducers connected to the moving parts of the servomotor or to a guide vane stem.
- 5.1.2.5 In case of a runner with movable blades, the blade angle shall be measured by special transducers connected to the feedback rod, or, if this is not possible, to the measuring device of the positioner.
- 5.1.2.6 If necessary, the opening of valves and gates can also be measured by suitable transducers.

* In order to obtain the specific hydraulic energy, the kinetic term should also be known. Since a direct measurement is usually not possible, an evaluation of the term can be made if approximate instantaneous discharge values are known. The error thus introduced is not usually important, since the kinetic term is generally small compared with the specific hydraulic energy.

5.2 Grandeurs vibratoires et fluctuantes à mesurer et localisation des points de mesure

Les grandeurs à mesurer en régime stabilisé et en régime transitoire doivent être déterminées cas par cas en fonction des objectifs et en commun accord entre les différentes parties (voir également la fin de l'introduction).

Différents types d'instruments peuvent être recommandés pour les mesures de vibrations de structures (par opposition aux mesures de fluctuations de pression et de puissance par exemple) selon la plage de fréquences à couvrir. Cette plage peut s'étendre de quelques dixièmes de hertz («basses» fréquences) jusqu'à quelques centaines de hertz («hautes» fréquences), voir 6.1.1.

Si l'on cherche des «basses» fréquences, le paramètre mécanique à mesurer pour évaluer l'état vibratoire de la machine est en général le déplacement (u ou d). Dans la plage des fréquences «moyennes», c'est souvent la vitesse (v) qui est mesurée, alors que dans la plage des «hautes» fréquences on préfère mesurer l'accélération (w).

Il est parfois recommandé de mesurer simultanément deux de ces grandeurs pour obtenir une plus ample information ou pour couvrir différentes plages de fréquence au cours d'un même essai.

Il faut cependant prendre des précautions particulières pour la mesure des vibrations en régime transitoire; il faut, en effet, dans ce cas, prendre aussi en considération la réponse du capteur lui-même aux transitoires. Il faudra en particulier choisir la fréquence propre et le facteur d'amortissement du capteur en fonction du type et de la durée du transitoire affectant la grandeur à laquelle le capteur est réceptif.

On notera que, dans des conditions de mesure particulièrement défavorables, la valeur des vibrations peut être surévaluée ou sous-évaluée*.

5.2.1 Les points les plus significatifs du point de vue des vibrations sont en général:

- a) logement de chaque palier-guide et de chaque support de butée (ou pivot);
- b) fond supérieur de la machine hydraulique;
- c) console palière de l'alternateur;
- d) partie non bétonnée du manteau ou partie supérieure du cône aspirateur (pour les groupes Kaplan et bulbe);
- e) manteau et nervures d'un bulbe;
- f) directrices (pour les machines réglables);
- g) avant-directrices dans des cas spéciaux; etc.

On peut, dans chaque cas particulier, allonger ou réduire cette liste selon les conditions.

Selon le cas, il convient de positionner les capteurs de vibrations comme suit:

- en direction radiale, deux capteurs à 90° l'un de l'autre, sur le logement de chaque palier-guide;
- en direction axiale aussi près que possible de l'axe de rotation de la machine, sur le palier de butée;
- en direction radiale aussi loin que possible des bords de la partie non bétonnée du manteau;

* Pour les cas ou clauses particuliers, se référer aux Normes ISO 5348, 8042 et 5347.

5.2 *Vibration and pulsation quantities to be measured and locations of measuring points*

The quantities to be measured during steady state and transient operation shall be determined case by case depending on the objectives and by mutual agreement between the parties (see also the final part of the Introduction).

As far as measurements of structural vibrations (as distinct e.g. from pressure or power pulsations) are concerned, different kinds of measuring instruments are recommended according to the frequency range to be covered. This range can occur in a wide interval, from a few tenths of a hertz ("low" frequencies) to a few hundred hertz ("high" frequencies), see 6.1.1.

If "low" frequencies are to be investigated, the mechanical parameter to be measured in order to assess the vibrational state of the machine is usually the displacement (u or d). In the "medium" frequency range, velocity (v) is often measured, while in the "high" frequency domain the acceleration (w) is preferentially measured.

Sometimes it may be advisable to simultaneously measure two of these quantities in order to get more information or to cover different frequency ranges in the same test.

However, particular care must be taken regarding the measurements of the vibrations in transient conditions; in fact in this case the transient response of the transducer must be taken into account too. In particular, the natural frequency and damping factor of the transducer will have to be chosen in relation to the type and duration of the transient expected for the variable to which the transducer is sensitive.

It must be noted that in the case of particularly unfavourable measurement conditions the value of the vibrations can be overestimated or underestimated*.

5.2.1 The most significant points where vibration is concerned are generally:

- a) housing of each guide bearing and support frame of thrust bearing;
- b) head cover of the hydraulic machine;
- c) generator bearing bracket;
- d) non-concreted part of the discharge ring or top of draft tube cone (for Kaplan and bulb units);
- e) bulb shell and ribs;
- f) guide vanes (for regulated machines);
- g) stay vanes in special cases, etc.

In each particular case this list could be extended or shortened, according to the actual conditions.

According to the case, vibration transducers should be positioned as follows:

- on radial lines 90° apart for each guide bearing housing;
- in an axial direction as close as possible to the machine axis of rotation for the thrust bearing support frame;
- on a radial line located as far as possible from the limits of the part of the discharge ring that is not concreted;

* For special cases or provisions, refer to ISO Standards 5348, 8042 and 5347.

- en direction radiale et tangentielle sur les nervures dans deux sections transversales du bulbe, l'une située à proximité du palier-guide de la machine hydraulique, l'autre à proximité de l'alternateur;
- sur toute partie accessible, liée rigidement à une directrice, et selon les directions suivantes:
 - parallèlement à l'axe de rotation de la directrice;
 - perpendiculairement à l'axe de rotation, et selon la direction de rigidité minimale de la directrice;
 - perpendiculairement à l'axe de rotation ainsi qu'à la direction précédente.

5.2.2 Les *vibrations radiales de l'arbre* doivent normalement se mesurer dans des sections proches des paliers-guides. Il faut, pour ces mesures, placer deux capteurs de proximité* à 90° l'un de l'autre, en direction radiale, et ce pour chacune des sections de mesure. Pour mesurer des vibrations relatives entre l'arbre et les paliers-guides, on fixera les capteurs sur les logements des paliers, aussi près que possible de l'arbre. Dans le cas où les vibrations absolues de l'arbre présentent un intérêt, il faut prévoir si possible un point fixe pour les capteurs**.

Il suffit, en temps normal, de mesurer les vibrations près des logements de palier. Ce n'est que dans certaines conditions particulières qu'il peut être nécessaire de mesurer les oscillations de flexion de l'arbre en rotation en différents points (situés entre les logements de palier) par rapport à un point fixe (mouvement «absolu»). Dans ce cas, pour savoir où placer les capteurs le long de l'axe de l'arbre, il faut procéder à des calculs préliminaires permettant de déterminer les modes de flexion théoriques de l'arbre (ces calculs donnent également les fréquences théoriques correspondantes).

Il convient alors de placer les capteurs au voisinage des points d'amplitude maximale des modes de flexion à considérer. Il y a lieu d'utiliser deux capteurs placés radialement et à 90° l'un de l'autre pour chaque emplacement.

5.2.3 Il convient de mesurer les *fluctuations de pression* en des points significatifs tels que:

- a) côté haute pression de la machine et éventuellement dans la conduite forcée;
- b) dans l'aspirateur et aussi dans le canal de fuite si nécessaire;
- c) sur le fond supérieur, entre les directrices et la roue, etc.

Les capteurs de pression doivent être installés:

- a) du côté haute pression de la machine;
- b) dans l'aspirateur, à une distance variant entre 0,5 D_5 et 1,0 D_5 du point d'intersection entre l'axe de la pale de la roue et le manteau pour les machines Kaplan, hélice et à écoulement diagonal, et à une distance de 0,2 D_5 à 0,8 D_5 par rapport au bas de la ceinture de roue pour une Francis, D_5 étant le diamètre d'aspiration.

Pour des aspirateurs en coude, les positions recommandées sont dans les parties externe, respectivement interne, du coude.

5.2.4 Les *fluctuations de contraintes* s'obtiennent par des calculs à partir des déformations mesurées (voir annexe A). Les mesures s'effectuent généralement avec des jauges à résistance électrique placées en des points significatifs, tels que des trous, rainures, congés de raccordement, ou en des points particuliers du mode de déformation pour lesquels existent des concentrations de contraintes et un haut risque de rupture (p. ex. section d'encastrement des augets Pelton).

* Les capteurs de proximité indiquent le déplacement dynamique relatif de deux points vibrant l'un par rapport à l'autre (voir 2.3.1.4; $d(t)$).

** Si cela n'était pas possible, voir les recommandations de la Norme ISO 7919.

- radially and tangentially on ribs at two cross sections within the bulb area, one of them being located near the hydraulic machine guide bearing and the other near the generator;
- on any accessible part rigidly fixed to the guide vane and according to the following directions:
 - parallel to the rotation axis of the guide vane;
 - normal to the rotation axis and to the plane of minimum rigidity of the guide vane;
 - normal to the rotation axis and to the previous direction.

5.2.2 *Radial vibrations on the shaft* should be measured near the guide bearings. For these measurements, proximity transducers* should be used positioned 90° apart on two radial lines at each measuring section. To measure relative vibrations between shaft and guide bearings, transducers will be fixed on the bearing housing, as near as possible to the shaft. If the absolute vibrations of the shaft are of interest, a stationary base should be provided for the transducers, if possible**.

Normally it is sufficient to measure the shaft vibrations near the bearing housings. Only under special conditions may it be necessary to measure the flexural oscillations of the rotating shaft at different locations between the bearing housings with reference to a fixed point ("absolute" motion). In this case, in order to have an idea where to put the transducers along the shaft axis, preliminary computations should be carried out, leading to the determination of the theoretical flexural modal shapes of the shaft (these computations will also yield the corresponding theoretical frequencies).

Transducers should then be placed near the locations of maximum amplitude of significant flexural modal shapes. Two transducers along shaft radii at 90° from each other should be used for each location.

5.2.3 *Pressure pulsations* should be measured in significant locations, such as for instance:

- a) on the high pressure side of the machine and if necessary in the penstock;
- b) in the draft tube and if necessary also in the tailrace;
- c) on the wet surface of the head cover, in the interspace between guide vanes and runner/impeller, etc.

Pressure pulsation transducers should be installed:

- a) on the high pressure side of the machine;
- b) in the draft tube at a distance of $0.5 D_5$ to $1.0 D_5$ from the point of intersection of the runner/impeller blade centerline and the discharge ring for Kaplan, propeller and diagonal flow machines, and at a distance of $0.2 D_5$ — $0.8 D_5$ from the bottom face of the band of a Francis runner/impeller, D_5 being the suction diameter.

For curved draft tubes preferred locations are at the inner and outer contour of the elbow.

5.2.4 *Stress pulsations* are obtained by calculations from the measured strains, see Appendix A. The measurements usually are carried out with electrical resistance gauges placed at significant locations like holes, grooves, fillets or particular points of the modal shape with concentrated stresses and a higher risk of fracture (e.g. Pelton bucket roots).

* The proximity transducers give the dynamic relative displacement of two vibrating points with respect to one another (see 2.3.1.4; $d(t)$).

** If not possible, see the recommendations of ISO 7919.

- 5.2.5 Les *fluctuations du couple sur l'arbre* s'obtiennent par la mesure des déformations de torsion en des endroits appropriés sur l'arbre, entre la roue et la machine électrique (voir figure 5 et annexe B). Les endroits présentant une rigidité de torsion réduite sont à privilégier, du fait d'une meilleure résolution du signal. La transmission du signal de la partie en rotation à la partie fixe peut se faire par bagues collectrices ou par un dispositif de transmission sans contact.
- 5.2.6 Les *fluctuations de la vitesse de rotation* peuvent se mesurer avec des dispositifs optiques, magnétiques ou autres. Elles peuvent se mesurer en tout point accessible de l'arbre, mais il convient de prendre garde au fait que des mesures effectuées en différents points peuvent donner des résultats différents dans le cas d'arbres longs, du fait de leurs oscillations en torsion.
- 5.2.7 Si les *fluctuations de puissance* en question sont celles de la machine électrique, il faut mesurer les grandeurs électriques à l'entrée du moteur ou à la sortie de l'alternateur. Ces grandeurs incluent l'excitation ou la réaction du réseau, s'il y a lieu.
- Les fluctuations de la puissance mécanique de l'arbre peuvent différer de celles de la puissance électrique en raison des effets d'inertie dus à la rotation. Les fluctuations de la puissance mécanique peuvent s'obtenir par calcul si le couple sur l'arbre et la vitesse de rotation ont été mesurés en un même point de l'arbre.
- 5.2.8 Les *fluctuations du couple sur une directrice* peuvent se mesurer sur l'axe de cette directrice ou sur la bielle de commande par une mesure de déformations (voir figures 6 et 7 ainsi que l'annexe B). Le frottement dans les paliers influe sur les résultats d'une valeur inconnue.
- 5.2.9 Les *fluctuations de la poussée radiale sur les paliers-guides* s'obtiennent par une mesure de déformations. Dans les paliers à patins oscillants, il faut mesurer les forces sur le pivot de chaque patin pour trouver la force résultante du palier. Des difficultés se présentent pour tous les autres types de paliers, si rien n'est prévu pour la mesure dès le stade de la conception. Dans certains cas, la mesure des déformations sur les logements de palier peut être acceptée. L'installation de deux capteurs à 90° l'un de l'autre doit être prévue chaque fois que possible.
- 5.2.10 Les *fluctuations de la poussée axiale sur le palier de butée* peuvent s'évaluer en tant que:
- a) fluctuations de réaction sur les structures support par des mesures de déformations ou de déflexions sur les bras des croisillons dont la rigidité peut se calculer ou s'étalonner (par soulèvement par exemple);
 - b) fluctuations de la poussée sur la butée par des mesures de déformation sur chaque patin;
 - c) fluctuations de la poussée axiale sur l'arbre par des mesures de déformation longitudinale, à l'aide de jauges de contraintes dûment compensées (voir annexe B).
- 5.3 *Personnel*
- 5.3.1 Sauf stipulation contraire du contrat, les parties procéderont conjointement au choix du personnel d'essai ainsi qu'aux méthodes et procédures de réalisation de ces derniers.
- 5.3.2 Un Chef d'Essais sera désigné par accord mutuel entre les différentes parties. Il organisera et supervisera les essais et rendra compte de leur déroulement et des résultats. Il sera responsable du calcul des résultats et de l'élaboration du rapport final. Il sera l'ultime autorité pour toute question relative aux essais ou à leur exécution.
- 5.3.3 L'acheteur et le fournisseur seront autorisés à faire participer des membres de leur personnel, au moins en tant qu'observateurs.
- 5.4 *Accord sur la procédure d'essai*
- 5.4.1 En règle générale, les essais de vibrations et le fluctuations sont effectués à la demande de l'acheteur ou du fournisseur, sur accord réciproque.

5.2.5 *Shaft torque pulsations* can be obtained by measurement of the torsional strains at suitable locations on the shaft between the runner and the electrical machine (see Figure 5 and Appendix B). Locations with a reduced torsional stiffness are preferred due to a better resolution of the signal. Signal transmission from the rotating to the non-rotating part can be made by means of slip-rings or a contactless transmitter device.

5.2.6 *Rotational speed pulsation* can be measured with optical, magnetic or other devices. It can be measured at any accessible location on the shaft, but it should be noted that measurements taken at different locations could yield different results, in the case of long shafts, due to their torsional oscillations.

5.2.7 If the *power pulsations* in question are those of the electrical machine, the electrical quantities at the input of a motor or output of a generator have to be measured. These include the network excitation or reaction, if any.

The pulsations of the mechanical power in the shaft can differ from those of the electrical power due to rotational inertia effects. Mechanical power pulsations can be obtained by calculation if the shaft torque and rotational speed have been measured at the same location of the shaft.

5.2.8 *Guide vane torque pulsations* can be measured at the guide vane stem or at the guide vane link by means of a strain measurement (see Figures 6 and 7 and Appendix B). The bearing friction influences the results to an unknown extent.

5.2.9 *Radial thrust pulsations at guide bearing* can be measured by means of strain measurements. In tilting-pad bearings the forces have to be measured in the pivot of each shoe to find the resulting bearing force. With all other bearing types difficulties arise if no provision for the measurement is made at the design stage of the bearing. In such cases strain measurements in the bearing supports could be acceptable. The installation of two transducers located at 90 degrees from each other is to be provided for whenever possible.

5.2.10 *Axial thrust pulsations at the thrust bearing* can be evaluated as:

- a) reaction pulsations on the supporting structures, by means of strain or deflection measurements on members whose stiffness can be determined or calibrated (e.g. by jacking);
- b) thrust bearing load pulsations, by means of strain measurements on every bearing element;
- c) axial load pulsations on the shaft, by means of longitudinal strain measurements, through strain-gauges duly compensated (see Appendix B).

5.3 *Personnel*

5.3.1 Unless otherwise provided for in the contract, the contracting parties shall jointly select the test personnel and the test methods and procedures.

5.3.2 A Chief of Test shall be appointed by agreement between the parties concerned. He shall manage and supervise the test and report on test progress and results. He shall be responsible for the computation of results and the preparation of the final report. On any question pertaining to the execution of tests, his decision shall be final.

5.3.3 The purchaser and the supplier shall be entitled to have members of their staff present, at least as observers.

5.4 *Agreement of test procedure*

5.4.1 As a rule, vibration and pulsation tests are carried out at the request of the purchaser, or of the supplier after mutual agreement.

5.4.2 La procédure à suivre pour les essais sera déterminée par le Chef d'Essais. Toutes les dispositions et planifications des essais devront être soumises à l'acheteur et au fournisseur en temps utile, pour remarque et acceptation.

5.5 *Programme d'essais*

Le programme des essais est rédigé par le Chef d'Essais en tenant compte des stipulations énoncées ci-après; il doit être soumis à l'acheteur et au fournisseur pour approbation. Le programme comportera le détail des points suivants:

5.5.1 But de l'essai.

Celui-ci doit être conforme à l'article 1.

5.5.2 Liste des grandeurs à mesurer et localisation des capteurs.

5.5.3 Revue des travaux préparatoires.

Une liste des travaux préparatoires sera établie et leur durée précisée pour les cas de fonctionnement et d'arrêt de la machine.

5.5.4 Liste détaillée des essais prévus.

Cette liste comportera des spécifications sur les conditions d'essais, la durée de chacun des essais, la durée totale des essais; de même, les grandeurs à mesurer dans chacune des conditions d'exploitation devront être indiquées. Les conditions d'exploitation et les vérifications spécifiées en 4.1 et 4.2 figureront dans le programme des essais.

5.5.5 Instruments de mesure.

Les instruments et méthodes à utiliser pour la mesure et l'enregistrement de toutes les grandeurs figurant dans le programme seront spécifiés. En outre, une description détaillée du système d'étalonnage utilisé devra être fournie. Les tâches à effectuer par les personnes responsables des mesures devront également être indiquées (le personnel de la centrale peut être chargé d'effectuer certaines mesures).

5.6 *Préparation des essais*

5.6.1 Tous les dossiers et rapports concernant la dernière inspection de la machine (après construction, mise en service ou dernière réparation), et concernant son fonctionnement, devront être examinés, ainsi que la machine elle-même. Cette disposition a pour but de vérifier, dans la mesure du possible:

- a) que l'équipement est rigoureusement conforme aux spécifications;
- b) que les graduations de l'ouverture du distributeur (ou des injecteurs) et l'angle de position des pales de la roue correspondent bien aux mesures effectives;
- c) que les conduits hydrauliques ne sont ni bouchés ni même obstrués partiellement par un corps étranger;
- d) qu'aucune usure anormale des pièces importantes n'est apparue;
- e) que les jeux aux paliers sont conformes aux spécifications;
- f) que l'alignement de l'arbre se trouve dans les limites admissibles;
- g) qu'aucune des conditions d'essai répertoriées ne dépasse la plage de fonctionnement admissible de la machine.

5.6.2 Un système de communication devra être établi entre les divers points où seront effectuées les mesures.

5.4.2 The procedure to be followed in the test shall be established by the Chief of Test. All arrangements and the plan for the test are to be submitted to the purchaser and supplier in ample time for consideration and agreement.

5.5 *Test programme*

The programme of tests is drafted by the Chief of Test taking into account the requirements of the following sub-clauses; it is to be submitted to the purchaser and supplier for agreement. The programme shall include particulars concerning the following items:

5.5.1 Purpose of the test.

This shall comply with clause 1.

5.5.2 List of quantities to be measured and location of transducers.

5.5.3 Scope of preparatory work.

Preparatory operations shall be listed and their duration stated for the cases of machine operation and shut-down.

5.5.4 Detailed list of scheduled tests.

This shall include a statement on test conditions, duration of test runs, total duration of the test; also the quantities to be measured under each of the operating conditions shall be indicated. Operating conditions and checks specified in 4.1 and 4.2 shall be included in the test programme.

5.5.5 Measuring equipment.

Instruments and methods to be used for measurement and recording of all the quantities included in the programme shall be stated. Furthermore, a detailed description of the calibration procedures utilized shall be supplied. The tasks of persons responsible for the measurements shall also be stated (the power station personnel may perform certain measurements).

5.6 *Preparations for tests*

5.6.1 All necessary records and reports on the latest inspection of the machine (after erection, commissioning or the latest repair) and on its operation shall be examined and the machine itself shall be inspected. The purpose of this is to verify, as far as possible:

- a) that the machinery is complete according to specifications;
- b) that the scales of guide vane or nozzle opening and runner blade angle correspond with actual measurements taken;
- c) that water passages are not obstructed or restricted by any foreign material;
- d) that no undue wear of important parts has taken place;
- e) that clearances in the bearings conform to specifications;
- f) that alignment of the shaft is within the acceptable limits;
- g) that no test condition listed in the programme lies outside the permissible range of operation of the machine.

5.6.2 A communication system shall be provided between the stations where measurements are carried out.

- 5.6.3 Les capteurs devront être installés aux points spécifiés dans le programme d'essais.
- 5.6.4 Après installation des amplificateurs et des enregistreurs, et après les avoir connectés, tous les instruments devront être vérifiés et être prêts à fonctionner.
- 5.6.5 Il est recommandé d'établir un schéma de la localisation des capteurs, et d'attribuer des numéros de référence et des désignations à tous les capteurs. Il est recommandé de donner les indications suivantes sous forme de tableau:
- emplacement du capteur;
 - numéro de référence ou désignation;
 - type de capteur et numéro de série;
 - identification de chaque câble ou fil;
 - type et numéro de l'amplificateur, de l'enregistreur et de l'analyseur;
 - identification de chaque canal de mesure.
- 5.6.6 L'étalonnage des instruments doit se faire après le montage ou, du moins, sur site dans la mesure du possible. Tous les instruments ne pouvant être étalonnés sur site seront accompagnés de documents d'étalonnage récents. Avant de procéder aux essais officiels, les échelles de toutes les grandeurs enregistrées ainsi que la vitesse et la durée d'enregistrement auront été préalablement déterminées. Une fois les essais terminés, il faudra procéder à un nouvel étalonnage, dans la mesure du possible. On peut omettre le ré-étalonnage sur accord spécial.
- 5.6.7 Une fois les préparatifs terminés, le Chef d'Essais certifie que ceux-ci ont été effectués conformément au programme d'essais; ou conclut un accord sur les déviations par rapport au programme.
- Un accord de toutes les parties sur les grandeurs mesurées, les instruments et les conditions d'exploitation dans lesquelles seront effectuées les mesures, est essentiel.
- 5.7 *Observations*
- 5.7.1 L'essai est effectué dans les conditions de fonctionnement spécifiées dans le programme. Toutes les grandeurs caractéristiques sont enregistrées lors de chaque essai. Un exemple du bordereau d'observation est donné en annexe C (voir figures C1 et C2). Le Chef d'Essais peut exprimer son avis personnel (estimation) sur l'état vibratoire de la machine, ou d'une de ses parties constituantes, directement sur le bordereau d'observation, et à chaque essai.
- 5.7.2 Il faut enregistrer un nombre suffisant d'informations au cours des essais de façon à pouvoir calculer tous les facteurs de conversion et situer chacun des enregistrements par rapport à l'essai global.
- 5.7.3 Pour chaque essai, tous les relevés ou enregistrements seront effectués au même instant grâce à des signaux optiques ou acoustiques envoyés simultanément à tous les observateurs. Un signal de synchronisation électrique sera enregistré sur tous les enregistreurs, chaque fois que possible.
- 5.7.4 S'il faut procéder aux relevés et aux enregistrements en régime stabilisé, le signal de départ devra être donné suffisamment longtemps après modification de la position du distributeur (des injecteurs) et/ou de la position des pales de la roue*.
- 5.7.5 Il convient de mesurer simultanément vibrations et fluctuations pendant les essais.

* Le temps d'attente doit garantir, dans chaque cas, qu'un nouvel état stabilisé a été atteint.

- 5.6.3 Transducers shall be installed at points specified in the test programme.
- 5.6.4 After completion of installation of amplifiers, recorders and their connecting lines, all instruments shall be checked and made ready for use.
- 5.6.5 It is recommended that a transducer layout diagram should be drawn and reference numbers or designations should be assigned to all transducers. The following information is recommended to be given in tabular form:
- transducer location;
 - reference number or designation;
 - transducer type and serial number;
 - identification of each cable or wire;
 - type and serial number of amplifier, recorder and analyser;
 - identification of each measuring channel.
- 5.6.6 Calibration of instruments shall be carried out after mounting or at least on site as far as possible. All instruments which cannot be calibrated on site shall be provided with up-to-date calibration documents. Prior to the official tests, scales of all recorded quantities and the speed and duration of recording shall be determined. Upon completion of the tests, calibration shall be repeated as far as possible. The repetition of calibration may be omitted by special agreement.
- 5.6.7 Upon completion of the preparations the Chief of Test certifies that the preparations have been made in accordance with the test programme or makes an agreement on deviations from the programme.
- An agreement of all parties concerned is essential on measured quantities, instruments and operating conditions under which the measurements will be made.
- 5.7 *Observations*
- 5.7.1 The test is carried out under the operating conditions specified in the programme. All characteristic quantities are recorded during each test run. Sample forms of the observation sheets are given in Appendix C (see Figures C1 and C2). The Chief of Test can express his personal opinion (estimate) on the vibrational state of the unit or its structural part directly on the observation sheet for each test run.
- 5.7.2 Sufficient information shall be recorded during the tests, so that all conversion factors can be computed and all individual records can be coordinated with respect to the test run.
- 5.7.3 All readings or recordings for any given test run shall be taken at the same time, this being ensured by an optical and/or acoustic signal sent simultaneously to all observers. An electrical synchronizing signal shall be recorded by all recording instrumentation, whenever possible.
- 5.7.4 If readings or recordings are to be taken during steady state operation, the starting signal shall be given a sufficient time after the position of a runner vane or nozzle and/or guide blade has changed*.
- 5.7.5 Pulsations should be measured simultaneously with vibrations during the tests.

* The elapsed time should in each case ensure that a new steady state condition has been attained.

5.7.6 Un premier traitement des données s'effectue pendant les essais ou immédiatement après. Les résultats et les données relatives aux conditions d'essais sont relevés sur les bordereaux d'observation, dont un exemplaire vierge est donné en annexe C.

5.8 Reprise des essais

Une fois les essais accomplis, les enregistrements sont examinés par toutes les parties concernées et des résultats représentatifs sont provisoirement calculés sur le site avant la dispersion du personnel d'essai. Si l'une des parties manifeste son mécontentement pour des motifs clairement exposés, elle a le droit de demander que les essais soient repris en partie.

SECTION TROIS — MÉTHODES DE MESURE, SAISIE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

La présente section traite de la détermination des valeurs caractérisant les vibrations des diverses pièces et assemblages de machines hydrauliques (voir 5.2.1 et 5.2.2), les fluctuations de pression dans les conduits hydrauliques (voir 5.2.3) et les autres valeurs nécessaires à l'obtention des paramètres de vibration et de fluctuation présentés aux sections un et deux du présent guide. Des recommandations sur la configuration des canaux de mesure et sur le choix de leurs éléments sont également données.

Parmi les différentes fluctuations à mesurer, celles de déformation peuvent revêtir une importance particulière du fait qu'il n'est généralement pas possible d'indiquer des limites admissibles précises pour les paramètres cinétiques de vibrations, telles que déplacements, vitesses ou accélérations. En conséquence, et en cas de doute, le jugement final sur l'acceptabilité des niveaux de vibrations peut dépendre du niveau des fluctuations de déformation (contrainte).

Quelques recommandations sur les procédures mettant en œuvre des jauges de déformation figurent à ce titre dans cette section, accompagnées de recommandations relatives aux mesures de vibrations et de fluctuations.

Les résultats de mesures pourront être présentés sous forme de tableaux, comme indiqué en annexe C.

On peut enregistrer et traiter les signaux comme suit (voir articles 8 et 9):

- enregistrement graphique d'un paramètre en fonction du temps (oscillogramme)*;
- enregistrement des valeurs efficaces et/ou des valeurs crête à crête ou crêtes, au moyen d'un enregistreur graphique numérique ou de tout autre dispositif;
- enregistrement des paramètres dépendant du temps par un procédé analogique ou numérique sur bande magnétique ou par stockage numérique en vue d'une reproduction et d'une analyse ultérieures*;
- densité spectrale de puissance.

Seuls les instruments ayant fait l'objet d'un contrôle strict ou d'un étalonnage comparatif (avec une référence), pour toute la gamme des modes de fonctionnement, d'amplitude et de fréquence peuvent être utilisés pour les mesures (voir article 7).

* Avec un repère de rotation pour enregistrer la phase par rapport à la position angulaire de l'arbre, chaque fois que nécessaire et que possible.

5.7.6 Preliminary data processing is done during the tests or immediately after the tests. The test results and the data concerning test conditions are recorded on the observation sheets; blank samples of such sheets are shown in Appendix C.

5.8 *Repetition of tests*

After completion of the tests the records shall be examined by all parties concerned and representative results shall be provisionally computed on site before dispersal of the testing staff. If there is any dissatisfaction with a test for clearly explained reasons, the dissatisfied party shall have the right to ask for the tests to be partly repeated.

SECTION THREE — METHODS OF MEASUREMENT, DATA ACQUISITION AND PROCESSING

This section deals with the determination of values characterizing vibrations of various parts and assemblies of hydraulic machines (see 5.2.1 and 5.2.2), pressure pulsations in water passages (see 5.2.3) and other values required to obtain vibration and pulsation parameters described in Sections One and Two of this guide. Recommendations are given on the arrangement of measuring systems and the selection of their separate elements.

Among the different pulsations to be measured, strain pulsations may be particularly important due to the fact that usually it is not possible to indicate precise allowable limits for kinematic vibration parameters, i.e. displacements, velocities or accelerations. Hence, in doubtful cases the ultimate judgement on the acceptability of vibration levels may hinge on the strain (stress) pulsation level.

Therefore, some recommendations on procedures for using strain-gauges are also given in this section, together with recommendations for other vibration or pulsation measurements.

The measurement results should be tabulated, e.g. as shown in Appendix C.

The signals may be recorded and processed as follows (see clauses 8 and 9):

- graphical recording of a parameter as a function of time (oscillograms)*;
- recording of r.m.s. and/or peak-to-peak or peak values by means of a digital recording instrument or other indicating device;
- time dependent parameter recorded analogically or digitally on magnetic tape or in digital storage for subsequent reproduction and analysis*;
- power density spectrum.

Only instruments reliably checked or calibrated with the reference ones for the whole range of modes of operation, amplitudes and frequencies should be used for the measurements (see clause 7).

* Together with a rotation indicator to record phase with respect to the angular position of the shaft, whenever necessary and possible.

6. Considérations relatives aux méthodes de mesure

6.1 Vibrations

6.1.1 Pour choisir le moyen de mesure, il est nécessaire de déterminer les limites en fréquences supérieure et inférieure pour les vibrations et les fluctuations escomptées. Ces limites sont influencées par le spectre de fréquences des forces d'excitation ainsi que par les fréquences propres des aubes, augets, pales, etc.

On peut appliquer, si possible, les relations suivantes (à défaut de meilleurs renseignements):

a) Limite inférieure de fréquence:

$$f_L = 0,1 f_{sp} *$$

où f_{sp} = fréquence de rotation à la vitesse spécifiée.

b) Limite supérieure de fréquence**:

— turbines Pelton:

$$f_U = z_2 \cdot \frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot f_{sp}$$

où φ_n = angle minimal entre l'axe des injecteurs (en radians) si les injecteurs ne sont pas disposés symétriquement et $\varphi_n = 2\pi$, si $z_0 = 1$,

— autres types de machine

$$f_U = \max \left[z_0 \cdot z_2 \cdot f_{sp}, S \cdot \frac{v_w}{\delta} \right]$$

où S = nombre de Strouhal approprié ***

L'instrumentation doit être choisie en fonction de la plage de fréquence escomptée; on peut, si nécessaire, utiliser une combinaison des différents canaux de mesure pour couvrir la plage de fréquence tout entière.

Il faut partir du principe que, dans le cas de mesures effectuées en conditions transitoires, la période propre du capteur doit être aussi courte que possible par rapport à la durée de l'impulsion d'entrée.

On peut ainsi considérer comme bon un rapport de 5 à 1 entre la durée de l'impulsion et la période propre, dans le cas où le capteur n'est pas amorti; voir Normes ISO 8042 et 5347.

6.1.2 On peut constituer le canal de mesure selon les schémas donnés comme exemple en figure 4.

La figure 4a donne en particulier un exemple de disposition simple, adaptée aux essais en régime stabilisé ainsi qu'aux essais simples de transitoires en y ajoutant un enregistreur approprié. La figure 4b donne un exemple de disposition plus complète de la chaîne de mesure pouvant être avantageusement utilisée au cours des essais de transitoires pour lesquels l'enregistrement sur bande magnétique ou le stockage numérique sont fondamentaux.

* Dans le cas d'une turbine Francis, p.ex., la fréquence minimale de mesure doit être inférieure à la fréquence de la torche hydraulique, normalement comprise entre $1/4$ et $1/3$ de f_{sp} à charge partielle.

** Dans certains cas, des perturbations à des fréquences même supérieures à la limite indiquée dans la formule ci-dessus peuvent apparaître, p.ex. à des fréquences de l'ordre de 1 000 Hz, 2 000 Hz ou même plus (en relation avec les fréquences propres des augets, etc.). Chaque fois que nécessaire pour les résultats d'essais, il convient de fixer f_U en conséquence.

*** En première approximation, on peut appliquer $S = 0,15$ à $0,25$ (voir figures 1 et 2).

6. Considerations relating to the methods of measurement

6.1 Vibrations

6.1.1 For selecting the measuring means, it is necessary to determine the upper and lower frequency limits of the expected vibrations and pulsations. They are influenced by the frequency spectrum of the exciting forces as well as by the natural frequencies of blades, buckets, vanes, etc.

In the absence of other indications the following relations can be used, if possible:

a) Lower frequency:

$$f_L = 0.1 f_{sp} *$$

where f_{sp} = rotational frequency at specified speed.

b) Upper frequency**:

— for Pelton turbines:

$$f_U = z_2 \cdot \frac{2\pi}{\varphi_n} \cdot f_{sp}$$

where φ_n = minimum angle between axis of nozzles (in radians), if the nozzles are not symmetrically distributed and $\varphi_n = 2\pi$, if $z_0 = 1$,

— For other types of machine:

$$f_U = \max \left[z_0 \cdot z_2 \cdot f_{sp}, S \cdot \frac{v_w}{\delta} \right]$$

where S = a suitable Strouhal number ***

The instrumentation has to be selected according to the expected frequency range; if necessary, a combination of different measuring channels can be used to cover the whole range.

It must be considered that in the case of measurements during transient conditions, the natural period of the transducer as installed should be as short as possible with respect to the input pulse duration.

For instance a reasonable ratio between pulse duration and natural period would be of the order of 5 to 1 if the transducer is not damped; see ISO Standards 8042 and 5347.

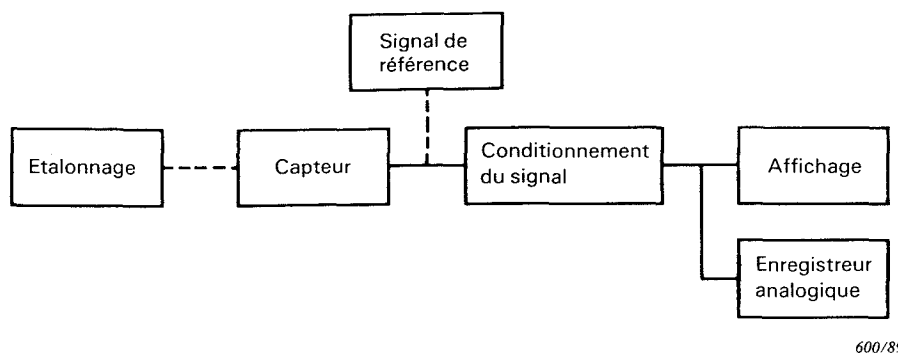
6.1.2 The measuring channel may be constructed, for example, in accordance with the block diagrams of Figure 4.

In particular, Figure 4a shows an example of a simple arrangement suitable for tests under steady-state conditions and, with an adequate recorder, for simple transient tests, whereas Figure 4b shows an example of a more complete arrangement of the measuring chain which can be used to advantage during transient tests for which recording on magnetic tape or in digital storage is fundamental.

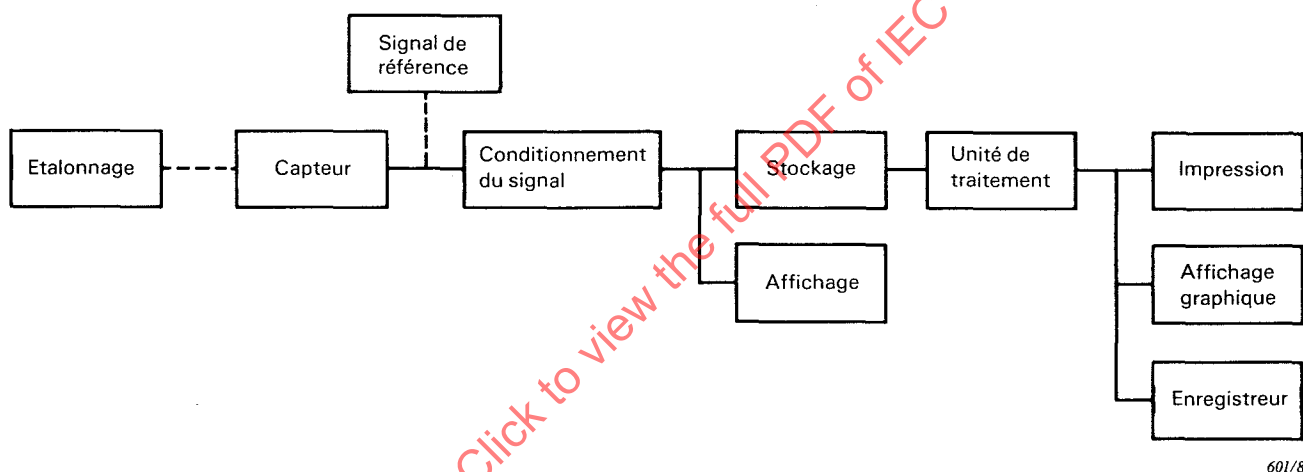
* In the case of a Francis turbine, e.g., the lower measurement frequency must be lower than the vortex rope frequency, normally between $1/4$ and $1/3$ of f_{sp} at partial load.

** In some cases, disturbances with even higher frequencies than the limit indicated by the above formula can be found, e.g. at frequencies of the order of 1 000 Hz, 2 000 Hz or even more, (this can be related to the natural frequencies of bucket vibration, etc.). Whenever this is of relevance to the test results, f_U should be fixed accordingly.

*** As a first approximation $S = 0.15$ to 0.25 can be used (see Figures 1 and 2).



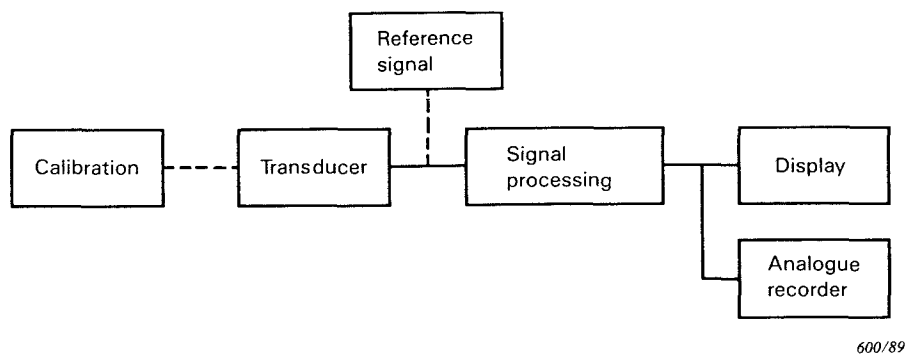
a) Configuration simple



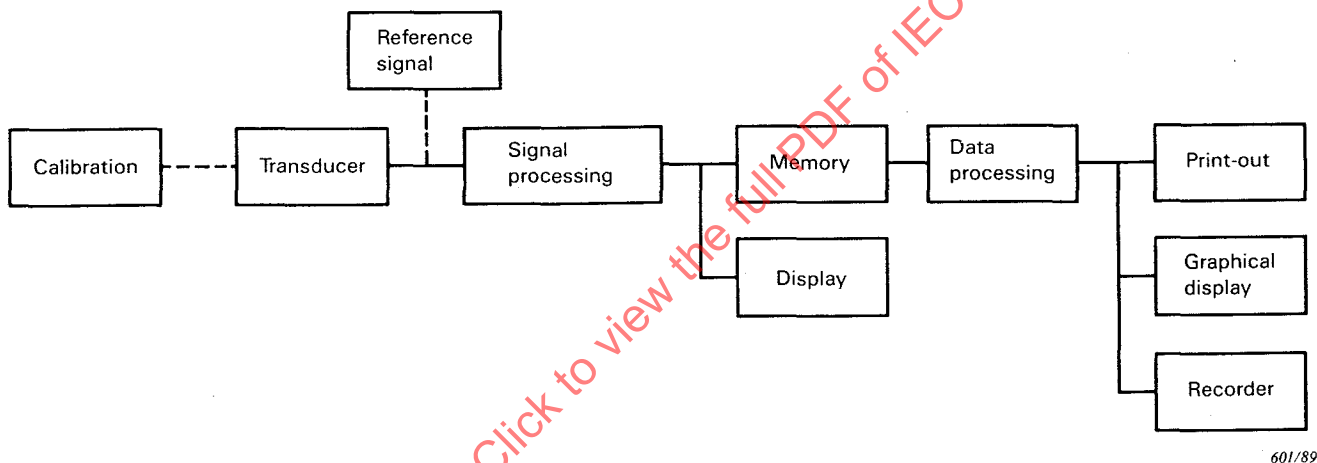
b) Configuration complète

—— Connexion permanente
 - - - Connexion temporaire (pour étalonnage seulement)

FIG. 4. — Combinaison de base des éléments d'un système de mesure et d'analyse des paramètres de vibrations.



a) Simple arrangement



b) Complete arrangement

————— Permanent connections
 - - - - - Temporary connections (for calibration only)

FIG. 4. — Basic combination of units for a measuring and analysis system for vibration parameters.

- 6.1.3 Il est recommandé d'utiliser des capteurs spécifiques pour chaque paramètre de vibrations (déplacement, vitesse et accélération).

Lorsqu'un paramètre n'est pas directement mesurable à défaut d'un capteur spécifique prévu à cet effet, l'intégration ou la différentiation des données fournies par un autre capteur peut théoriquement donner la réponse dans certains cas. Même s'il existe des dispositifs d'intégration ou de différentiation, leur application n'en nécessite pas moins des précautions particulières car ils sont susceptibles d'introduire de graves erreurs à la sortie de la chaîne.

La fréquence minimale f_{Lr} , mesurable par les capteurs de vibrations commercialisés, pouvant être supérieure à la fréquence minimale f_L à mesurer, il faut connaître les limites de fréquence du canal de mesure tout entier, ne serait-ce que par l'étalonnage fourni par le constructeur.

Il y a lieu que les capteurs à utiliser aient une réponse en fréquence ne variant pas de plus de $\pm 1,5$ dB par rapport à la linéarité sur toute la plage de fréquence choisie dans l'intervalle compris entre f_L et f_U^* .

La sensibilité des capteurs doit normalement permettre d'obtenir que le niveau minimal du signal à mesurer dépasse le niveau inférieur de sensibilité du canal de mesure d'au moins 10 dB (facteur 3 environ).

Il convient cependant de veiller à ce que la sensibilité du capteur ne soit pas telle que le signal maximal à mesurer risque de saturer le canal de mesure.

La limite inférieure de la plage dynamique est déterminée pendant les mesures de vibrations par le bruit du système de mesure, dont celui qui est émis par les circuits électroniques constitue l'élément principal.

Les boucles de masse peuvent représenter l'une des sources de bruit excessif.

Pour réduire le bruit d'un système de mesure, il est recommandé d'isoler électriquement le capteur de la structure étudiée.

La masse d'un capteur utilisé pour des essais de vibrations de machines hydrauliques sur site n'a généralement aucune influence sur la fréquence ou sur la forme modale vibratoire de la structure à laquelle le capteur est appliqué.

Dans le cas où, pour fixer les capteurs sur les pièces vibrantes, il faut recourir à des supports spéciaux, il convient de veiller à ce que cette fixation ait une rigidité suffisante.

Le capteur monté sur son support devra avoir une fréquence propre suffisamment supérieure à f_U .

Les méthodes utilisées pour déterminer les caractéristiques des capteurs doivent être conformes à la Publication 184 de la CEI.

- 6.1.4 La chaîne totale de mesure, y compris les capteurs, les amplificateurs, les appareils de traitement et de stockage des données doit être choisie de telle sorte que les caractéristiques de chaque canal soient compatibles avec la plage de fréquence requise.

* En cas d'impossibilité, une variation limite de ± 3 dB par rapport à la linéarité peut être tolérée dans certains cas. Sinon, il faut procéder à une compensation appropriée en fréquence en cours de mesure ou à un traitement des données sur la base de la courbe de réponse réelle du capteur ou canal de mesure.

- 6.1.3 It is recommended to use specific transducers for each vibration parameter (displacement, velocity and acceleration).

When a certain parameter is not directly measurable due to the lack of the specific transducer, integration or differentiation of the output of another transducer could in theory sometimes supply the answer. Even if integrating or differentiating devices are available, however, their application requires particular caution as they may introduce large errors into the chain output.

Since the minimum f_{Lr} frequency measurable by vibration transducers which are commonly on the market can be higher than the minimum f_L frequency to be measured, the frequency limits in the whole measuring channel should be known, if only from factory calibration.

The transducers to be used should have the frequency response not deviating from linear more than ± 1.5 dB over the frequency range chosen within the interval $f_L - f_U^*$.

Transducer sensitivity should be adequate to obtain a level of minimum signal to be measured exceeding the level of the lower limit of the dynamic range of the measuring channel by 10 dB (about 3 times) as a minimum.

On the other hand, the sensitivity should not be so great that the maximum signal to be measured may overload the measuring channel.

The lower limit of dynamic range is determined during vibration measurement by the measuring system noise. The noise of electronic circuits constitutes the main part of the noise.

Earth loops may be one of the causes of excessive noise.

To reduce noise in the measuring system, it is recommended to electrically insulate the transducer from the investigated object.

The alteration produced by the mass of a transducer employed for field vibration tests of hydraulic machines on the frequency or the vibrating modal shape of the structures to which the transducer is attached is usually negligible.

If special supports have to be used for fastening the transducers to the vibrating part, special care should be taken in order to ensure that this connection has adequate stiffness.

The natural frequency of the support with the transducer mounted shall be sufficiently higher than f_U .

The methods used for specifying the characteristics of transducers shall comply with IEC Publication 184.

- 6.1.4 The complete measuring chain, including transducers, amplifiers, data processing and data storage equipment has to be carefully selected so that the required frequency range for each individual channel is provided.

* When this is not possible, an upper deviation limit of ± 3 dB from linear could sometimes be tolerated. Otherwise, adequate frequency-dependent compensation should be made during measurement or data processing based on the actual response curve of the measuring channel.

Il faut vérifier si ce sont des capteurs de déplacement*, de vitesse ou d'accélération qui couvrent le mieux la plage de fréquence.

Dans certains cas, il y a lieu d'utiliser deux types de capteurs pour couvrir les différentes parties de la plage de fréquence.

Il faut autant que possible éviter le recours, dans les préamplificateurs, à des étages d'intégration qui risquent d'induire des erreurs ou inexactitudes de mesure imprévisibles (voir aussi 6.1.3).

Il faut vérifier très scrupuleusement que l'ensemble capteur, préamplificateur et câble n'affecte pas la précision des mesures et n'augmente pas le niveau du bruit électronique.

6.2 Vibrations radiales de l'arbre par rapport aux paliers

6.2.1 Des capteurs de déplacement relatif sans contact sont recommandés pour la mesure des vibrations de l'arbre par rapport aux paliers.

Les capteurs sont le plus souvent montés sur les logements ou sur les structures support des paliers.

6.2.2 Dans le seul cas de mesure des modes de flexion de l'arbre en rotation, il peut être nécessaire de monter les capteurs sur des supports rigides éloignés des paliers (voir 5.2.2).

6.3 Fluctuations de pression

6.3.1 Les instruments de mesure, amplificateurs en particulier, doivent si possible être conformes à la Publication 222 de la CEI.

6.3.2 Le canal de mesure peut être construit selon les diagrammes de la figure 4 (voir 6.1.2). Il convient, si possible, de fixer les capteurs au nu de la paroi en pression ou, sinon, veiller à éliminer le risque d'un effet de résonance ou d'amortissement dans le conduit de raccordement (voir annexe D). Il y a lieu également que la fixation ci-dessus mentionnée minimise la sensibilité aux chocs mécaniques et évite les oscillations secondaires dues au conduit de raccordement.

6.3.3 La plage de fréquence exigée de la chaîne de mesure doit au moins répondre aux conditions énoncées en 6.1.1 et inclure, si possible, la réponse en fréquence nulle (c.c.).

6.3.4 Il est recommandé que le pouvoir de résolution de la chaîne de mesure soit de 0,5% (au moins) de la différence de pression correspondant à l'énergie hydraulique massique. Il est souhaitable que la plage dynamique de la chaîne de mesure ne soit pas inférieure à 40 dB (facteur 100).

6.3.5 Capteurs

Le capteur doit normalement résister, sans altération de sa sensibilité ni de sa fréquence propre, à la pression maximale possible (y compris coup de bélier) en tout point de mesure; les écarts de linéarité du capteur ne doivent pas dépasser $\pm 1\%$ de la valeur nominale (pleine échelle) du capteur.

* Il existe deux types de capteurs de déplacement:

- à masse sismique (déplacement absolu, plage de fréquence dont la limite inférieure est fonction de la masse sismique et de son système de suspension);
- capteurs de déplacement relatif ou de proximité (entre le point vibrant et un support considéré comme fixe — fréquence limite inférieure = 0);

voir également 5.2.2.

It has to be checked whether the frequency range is better covered by the use of displacement*, velocity or acceleration transducers.

In some cases two different types of transducers should be used to cover different parts of the frequency range.

The use of integrating stages in the preamplifiers should be avoided if possible, because it may lead to non-predictable measurement errors or inaccuracies (see also 6.1.3).

It has to be checked very carefully that the combination of transducer, preamplifier and cable will not affect the measuring accuracy and will not cause an increase of the electronic noise level.

6.2 *Radial vibrations of the shaft relative to the bearings*

6.2.1 For the measurement of shaft vibrations relative to the bearings, contactless relative displacement transducers are recommended.

The transducers are mostly mounted on the housings or on the supporting structures of the bearing.

6.2.2 Only in the case of measurement of the flexural vibration modes of the rotating shaft, may it be necessary to mount the transducers on non-vibrating supports far from the bearings (see 5.2.2).

6.3 *Pressure pulsations*

6.3.1 The measuring instruments, especially amplifiers, should comply with IEC Publication 222.

6.3.2 The measuring channel may be constructed in accordance with the block diagrams of Figure 4 (see 6.1.2). The transducers should possibly be fixed flush with the wet wall, otherwise special care shall be taken to eliminate the risk of resonance and damping effects in the connecting pipe (see Appendix D). The above fixing should also minimize the sensitivity to mechanical shocks and avoid secondary oscillations in the connecting pipe.

6.3.3 The required frequency range of the measuring chain shall at least meet the conditions indicated in 6.1.1. The d.c. (zero frequency) response, if possible, should be included.

6.3.4 The measuring chain resolving power should be 0.5% (or better) of the pressure difference corresponding to the specific hydraulic energy value. It is desired that measuring chain dynamic range should be not less than 40 dB (a factor of 100).

6.3.5 *Transducers*

The transducer should withstand, without changing its sensitivity and natural frequency, the maximum possible pressure (including water-hammer) in any measuring point. Deviation of the transducer amplitude characteristic from linearity should not exceed $\pm 1\%$ of the nominal value (full scale) of the transducer.

* Displacement transducers can be of two types:

- with seismic mass (absolute displacement; frequency range with a lower limit dependent on the seismic mass and its suspension system);
- relative displacement transducers, e.g. proximity transducers (between the vibrating point and a support, considered as fixed. Lower frequency limit = 0);

see also 5.2.2.

6.4 Contraintes

- 6.4.1 Il est recommandé de mesurer les contraintes au moyen de jauges de déformation associées à un pont de mesure.
- 6.4.2 Il y a lieu de choisir les amplificateurs en fonction des jauges de déformation dans la plage de fréquence appropriée, comprise entre 0 Hz et f_U (voir 6.1.1).
- 6.4.3 A des températures comprises entre 0°C et 60°C, il est recommandé d'utiliser, comme capteurs, des jauges à fils, en lame mince ou d'un autre type, à condition que leurs caractéristiques remplissent les conditions suivantes:
- plage de déformations: $-2\,500$ à $+2\,500 \cdot 10^{-6}$ m/m;
 - écart type du coefficient de jauge ne dépassant pas 3% du coefficient moyen annoncé pour un même lot;
 - effet de déformation transversale ne dépassant pas 5% de l'effet de déformation longitudinale.
- Il y a lieu de prévoir une compensation en température si nécessaire.
- 6.4.4 Il convient que le coefficient de jauge (facteur K) soit connu. Il doit normalement figurer dans le certificat fourni par le constructeur.
- 6.4.5 La fixation des jauges doit suivre très exactement les prescriptions du constructeur. Il faut également prévoir une isolation rigoureuse contre l'humidité.
- 6.4.6 Des «rosettes» tridirectionnelles sont en principe utilisées pour déterminer la valeur et la direction des déformations principales; voir annexe A. Dans de nombreux cas, lorsque la direction des contraintes principales est bien connue, trois directions de mesures ne sont plus indispensables.

6.5 Fluctuations du couple sur l'arbre

6.5.1 Capteurs

On peut déterminer les fluctuations du couple sur l'arbre avec des jauges extensométriques si elles sont disposées de telle sorte qu'elles ne mesurent que la torsion (et non simultanément la flexion ou les déformations axiales) de l'arbre (voir figure 5). Le pouvoir de résolution de ce dispositif de mesure n'est en général pas très élevé du fait de la rigidité de l'arbre. Il est recommandé d'évaluer ce pouvoir de résolution avant de procéder aux mesures.

6.5.2 Transmission

Pour transmettre au poste de mesure le signal produit par le capteur de couple monté sur l'arbre en rotation, on peut utiliser les dispositifs suivants:

- bagues collectrices;
- transmetteurs capacitifs ou inductifs sans contact;
- transmetteurs rotatifs et récepteurs fixes d'ondes électromagnétiques.

Il faut constater que le bruit émis par ces transmetteurs limite souvent le pouvoir de résolution de la chaîne entière.

6.4 *Stresses*

- 6.4.1 It is recommended that the stresses should be measured by a strain-gauge method with the use of a bridge-type circuit.
- 6.4.2 Amplifiers should be selected in accordance with the requirements of the chosen strain-gauges in the frequency range of interest within the interval from 0 Hz to f_U (determined as in 6.1.1).
- 6.4.3 It is recommended that for temperatures from 0°C to 60°C wire, foil or other type gauges as sensing elements should be used, provided their properties are as follows:
- strain measuring range: $-2\,500$ to $+2\,500 \cdot 10^{-6}$ m/m;
 - standard deviation of the strain sensitivity coefficient for a batch of transducers not more than 3% of average of declared coefficient;
 - transverse deformation effect: not more than 5% of longitudinal deformation effect.

Temperature compensation should be provided if necessary.

- 6.4.4 Strain gauge sensitivity coefficient (K factor) should be known. It should be stated in the certificate provided by the manufacturer.
- 6.4.5 Fixing of strain gauges shall be exactly in accordance with the instructions of the manufacturer. Careful insulation against humidity shall be provided.
- 6.4.6 Three directional “rosettes” should be used to determine the magnitude and direction of the principal stresses, see Appendix A. In many cases, when the direction of the principal stresses is well known, less than three measuring directions can be used.

6.5 *Shaft torque pulsations*

6.5.1 *Transducers*

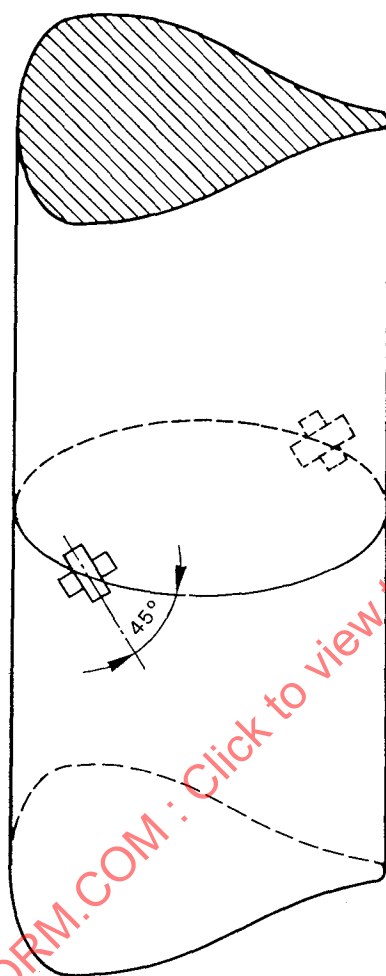
Shaft torque pulsation can be determined e.g. with strain gauges, if these are arranged so that they only measure torsion (and not simultaneously also bending or axial strain) of the shaft (see Figure 5). The resolving power of such a measuring system is frequently not particularly high due to the stiffness of the shaft. An estimation of the attainable resolving power prior to the measurement is recommended.

6.5.2 *Transmission*

For the transmission of the torque transducer output signal from the rotating shaft to the stationary equipment it is possible to use:

- slip rings;
- contactless capacitive or inductive transmitters;
- rotating transmitters and stationary receivers of electromagnetic waves.

It is to be noted that the noise occurring in these transmitters frequently limits the resolving power of the entire measuring chain.

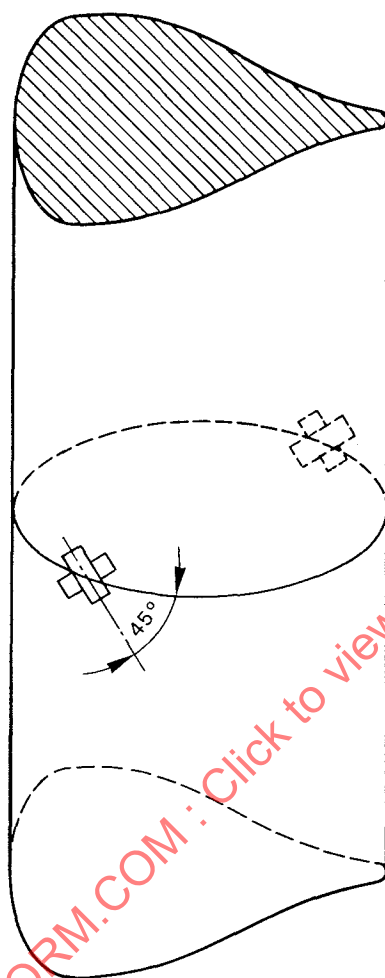


Quatre jauges extensométriques
montées en pont complet

Note — Deux rosettes bidirectionnelles à 90°, mises en place à 180° l'une de l'autre sur une même circonférence de l'arbre, représentent un système de mesure adéquat.

602/89

FIG. 5. — Dispositif à jauges extensométriques pour mesure du couple.



Four strain gauges full bridge connected

Note – The fitting of two rosettes, each comprising two perpendicular strain gauges, placed at 180° apart along the shaft circumference, is convenient.

602/89

FIG. 5. — Strain gauge arrangement for torque measurement.

6.6 *Fluctuations de la vitesse de rotation*

Les fluctuations de la vitesse de rotation se mesurent selon une méthode analogique ou numérique*.

Dans les mesures analogiques, on obtient généralement le signal à partir d'un générateur de fréquence ou d'un tachymètre couplé d'une quelconque façon à la machine. La fréquence proportionnelle à la vitesse captée est convertie en un signal analogique, dont les fluctuations d'amplitude indiquent les variations de vitesse.

Pour les mesures numériques des variations de vitesse, on utilise un générateur de fréquence. Dans ce cas, l'intervalle de temps (période) entre deux impulsions se mesure avec un instrument suffisamment rapide. Il faut faire un enregistrement numérique (voir 8.3) des valeurs mesurées et les évaluer ensuite selon une méthode appropriée.

6.7 *Fluctuations de puissance*

Des fluctuations de puissance peuvent parfois être observées en régime permanent. On peut les déterminer en mesurant la puissance électrique à la sortie de l'alternateur ou à l'entrée du moteur (voir aussi 5.2.7).

On peut, avec le même dispositif de mesure, obtenir les variations de puissance au démarrage, à l'arrêt, ainsi que lors des transitoires de variation de charge. Toutefois, dans le cas de transitoires particuliers, tels qu'un déclenchement, cette technique n'est plus applicable et il faut alors mesurer simultanément le couple sur l'arbre et la vitesse de rotation (voir 6.5 et 6.6). S'il s'agit de mesurer les fluctuations de la puissance mécanique, il convient de tenir compte de leur non-coïncidence avec les fluctuations de la puissance électrique, la différence étant constituée par les fluctuations de puissance nécessaires à l'accélération ou à la décélération des masses en rotation (les fluctuations des pertes électriques et mécaniques peuvent être considérées comme négligeables pour les essais en régime stabilisé).

6.8 *Fluctuations du couple sur les directrices*

Ces mesures s'effectuent sur des turbines et des pompes-turbines ou sur des pompes réglables. On ne peut en principe installer les capteurs qu'à l'extérieur des paliers des directrices, prenant ainsi en compte les frottements dans les paliers de valeur inconnue.

On peut mesurer le couple de deux façons:

- avec des jauges extensométriques fixées sur le tourillon (voir figure 6) de façon à éliminer toute influence éventuelle due à la flexion de l'axe;
- avec des jauges extensométriques fixées sur la bielle en un endroit adéquat de façon à éliminer toute composante de flexion de la bielle (voir figure 7). On peut, à partir de la force ainsi mesurée, calculer le couple sur la directrice en tenant compte de la géométrie du montage (voir aussi annexe B).

6.9 *Fluctuations de poussée radiale sur les paliers-guides*

Comme il est impossible, dans de nombreux cas, de mesurer précisément la poussée radiale sur la roue par des méthodes directes, il est préférable de se reporter aux mesures de poussée radiale sur les paliers-guides.

La force exercée sur un palier peut se mesurer en installant des capteurs appropriés (jauges extensométriques par exemple) sur un nombre suffisant de patins.

* Une attention particulière doit être portée, car certains systèmes de mesure de vitesse ont des délais de réponse intrinsèques.

6.6 *Rotational speed pulsations*

Rotational speed pulsations can be measured in the analogue or digital mode*.

In the analogue measurement one obtains the measuring signal usually from a frequency generator or a tachometer coupled with the machine in some way. The speed proportional frequency picked up is converted into an analogue signal whose amplitude fluctuations indicate the speed fluctuations.

With a digital measurement of speed fluctuations a frequency generator is to be used. In this case the time interval (period) between two pulses is measured with a sufficiently fast time measuring instrument. The measured values have to be recorded digitally (see 8.3) and evaluated after the measurement by suitable methods.

6.7 *Power pulsations*

During steady state operations, power pulsations can sometimes be observed. These pulsations can be determined by measuring the electrical output of the generator or the electrical input of the motor (see also 5.2.7).

By the same measuring arrangement, power changes during start-up, shut-down and load-change transients can normally be observed. However, for special transients, such as load rejection, this technique is no longer applicable and the only technique applicable is that of shaft torque and rotation speed measurement (see 6.5 and 6.6). If the pulsations to be measured are those of the mechanical power, one should also take into account the fact that they are not coincident with the pulsations of electric power, the difference being made up by pulsations of the power necessary to accelerate or decelerate the rotating masses (the pulsations of the electrical and mechanical losses can be taken as negligible for steady-state tests).

6.8 *Guide vane torque pulsations*

These measurements are made on turbines and pump-turbines or pumps with regulation. The transducers can normally be only outside the guide vane bearings and for this reason the measurement is influenced to an unknown extent by friction.

The torque can be measured in two ways:

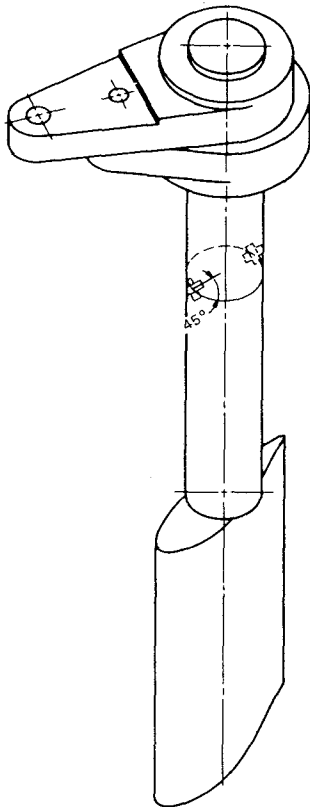
- with strain gauges fitted on the stem in such a way that influences, if any, due to bending of the stem, are eliminated (see Figure 6);
- with strain gauges fitted on the link at a suitable location (see Figure 7) in such a way that influences, if any, due to bending of the link member, are eliminated. From the force on the member measured in this way, the torque on the guide vane may be calculated taking into account the geometry of the system. See also Appendix B.

6.9 *Radial thrust pulsations measured at the guide bearings*

Since in many cases it is impossible to accurately measure the radial thrust on the runner by direct methods, it is preferable to refer to radial thrust measurements at the guide bearings.

The force on a bearing can be measured by providing a sufficient number of segments with suitable transducers (e.g. strain gauges).

* Special care has to be taken because some speed measuring equipment has an inherent time-delay.



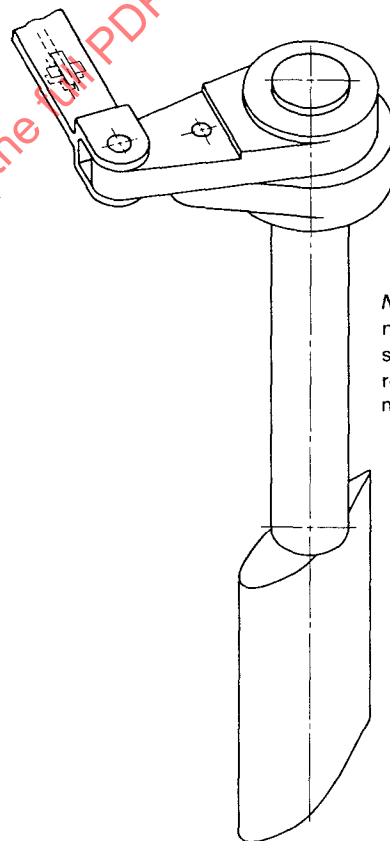
Quatre jauges extensométriques
montées en pont complet

Note – Deux rosettes bidirectionnelles à 90°, mises en place à 180° l'une de l'autre sur une même circonférence de l'arbre, représentent un système de mesure adéquat.

603/89

FIG. 6. — Tourillon de directrice équipé de jauges extensométriques pour la mesure du couple.

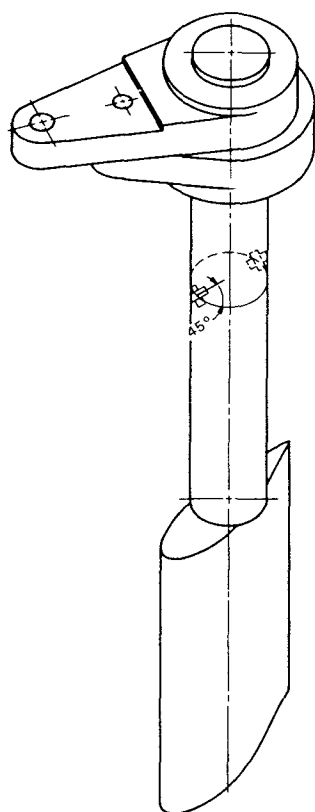
Quatre jauges extensométriques
montées en pont complet



Note – Deux rosettes bidirectionnelles à 90°, placées sur deux surfaces opposées de la biellette, représentent un système de mesure adéquat.

604/89

FIG. 7. — Mesure du couple sur une directrice au moyen de quatre jauges extensométriques placées sur la biellette de commande.

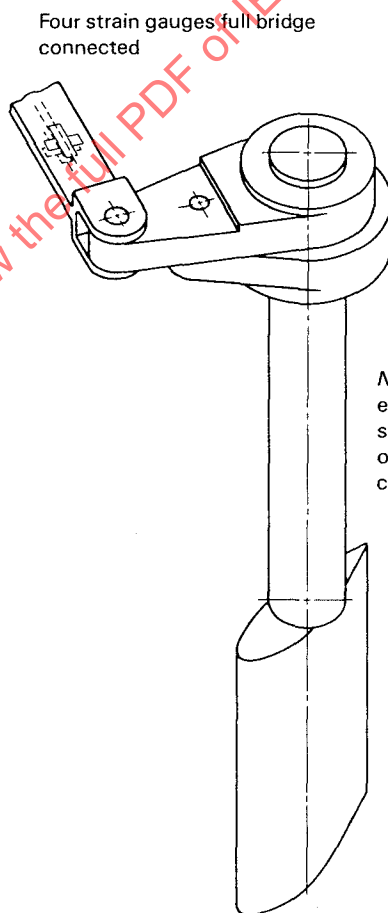


Four strain gauges full bridge connected

Note – The fitting of two rosettes, each comprising two perpendicular strain gauges, placed at 180° apart along the shaft circumference, is convenient.

603/89

FIG. 6. — Guide vane stem with strain gauges for torque measurement.



Four strain gauges full bridge connected

Note – The fitting of two rosettes, each comprising two perpendicular strain gauges and placed on the opposite surfaces of the link, is convenient

604/89

FIG. 7. — Torque measurement on one guide vane by means of strain gauges applied on the link.

Certains constructeurs essaient d'obtenir une indication des fluctuations de poussée radiale sur la roue en mesurant les variations de jeu au niveau de la ceinture de la roue au moyen de deux capteurs de déplacement sans contact situés à 90° l'un de l'autre, ou par des mesures de contraintes de flexion de l'arbre entre la roue montée en porte à faux et le palier le plus proche.

Toutefois, pour faire une évaluation des fluctuations de la poussée radiale sur la roue à partir de ces mesures, il faudrait interpréter le comportement en flexion de l'arbre.

6.10 *Fluctuations de poussée axiale sur le palier de butée*

Une mesure précise des fluctuations de la poussée axiale n'est possible qu'en équipant le matériel, lors de sa fabrication, avec des dispositifs spéciaux (en plaçant des jauges extensométriques sur un certain nombre de patins ou en utilisant une chambre d'huile à pression autonome en soubassement, etc.). Seule une approximation des fluctuations de la poussée axiale peut être obtenue en appliquant les méthodes suivantes:

- placer des jauges extensométriques sur la structure fixe servant de support au palier de butée;
- mesurer la déformation d'une pièce liée à la butée (avec un capteur de proximité fixé sur un mur par exemple);
- mesurer le déplacement axial de l'arbre (avec un capteur de proximité monté en regard d'un épaulement de l'arbre par exemple), etc.

6.11 *Grandeurs mesurées définissant le point de fonctionnement de la machine*

Les valeurs sont vérifiées et collectées selon la procédure habituelle en lisant les indications des instruments; elles sont ensuite incorporées dans des tableaux (voir annexe C).

Dans le cas où ces valeurs font l'objet d'un traitement informatique, il convient de les saisir une à une.

L'enregistrement continu de ces valeurs au cours des essais, en même temps que les valeurs de vibrations et de fluctuations, n'est recommandé qu'en cas d'importantes variations dans le temps.

Voici une liste partielle de ces valeurs:

- ouverture de robinet sphérique, de la vanne papillon, ou d'une autre vanne;
- ouverture du distributeur, des injecteurs, des pales;
- vitesse de rotation de la machine (lors d'essais de déclenchement);
- puissance de la machine;
- pressions instantanées côtés haute et basse pression.

7. **Étalonnage**

7.1 *Généralités*

Il faut procéder à l'étalonnage de l'appareillage avant et après les essais à titre de contrôle. Il est recommandé, pour les mesures de longue durée, de procéder à un étalonnage de contrôle à intervalles réguliers, tout au long des essais. Il convient que l'étalonnage soit effectué pour toutes les étendues de mesure (amplitude, fréquence et phase, si nécessaire) utilisées au cours des essais. La méthode, la portée et les résultats de l'étalonnage doivent figurer dans le programme des essais ainsi que dans le rapport final.

Some manufacturers attempt to get an indication of the radial thrust pulsations on the runner by measuring the clearance variations on the runner band by means of two contactless displacement transducers located at 90° from each other, or from measurements of the shaft bending stresses between a cantilever-mounted runner and the nearer bearing.

However, to get from these measurements an evaluation of the radial thrust pulsations on the runner, an interpretation of the shaft bending pattern would be necessary.

6.10 *Axial thrust pulsations measured at the thrust bearing*

Accurate measurement of the axial thrust pulsations can only be achieved by preparing the machine in the factory, providing it with special arrangements (e.g. fitting an adequate number of the segments with strain gauges, or measuring the oil pressure in a closed chamber under the bearing, etc.). Only approximate indications of the axial thrust pulsations can be achieved by the following methods:

- put strain gauges on the fixed structure supporting the thrust bearings;
- measure the deflection of a fixed part of the thrust bearing (e.g. with a proximity transducer connected to the wall);
- measure the axial displacement of the shaft (e.g. with a proximity transducer sensitive to the position of a ring protruding from the shaft), etc.

6.11 *Measured quantities defining the machine operating point*

The values are ascertained and compiled in the usual way by reading off from the associated instruments and by incorporating them into tables (see Appendix C).

In the event of further processing of the measured values in an EDP* system, they are to be entered separately.

Recording these values in a continuous way during the tests together with the vibration and pulsation values is required only in the case of data that may be subjected to wide variations with time.

Among them are:

- the opening of spherical valve, butterfly valve, or gate;
- the guide vane or needle(s) opening, runner blade angle;
- the machine rotational speed (in load rejection tests);
- the machine power;
- high and low pressure side instantaneous pressures.

7. Calibration

7.1 *General*

The calibration of the measuring system has to be carried out before and, as a check, after performance of the tests. For long duration measurements it is recommended to also carry out the check calibration at intervals throughout the tests. The calibration should be performed for all measuring ranges (magnitude, frequency and phase, if necessary) occurring during the tests. The methodology, the extent and the results of the calibration procedures have to be stated in the test programme and included in the final report.

* EDP = Electronic Data Processing.

Les signaux d'étalonnage doivent être enregistrés et éventuellement stockés avec le même matériel d'enregistrement et/ou de stockage que celui utilisé pour les mesures.

On applique en général l'une des deux méthodes suivantes:

- étalonnage direct de l'ensemble du canal de mesure, y compris les capteurs, amplificateurs, filtres, câbles de raccordement et appareils d'enregistrement. Dans cette méthode, le signal d'étalonnage est produit par excitation directe du capteur de façon bien définie;
- étalonnage par signaux électriques de référence, qui n'exclut en général que le signal du capteur en simulant celui-ci par un signal électrique bien connu.

On peut réaliser un étalonnage statique ou dynamique selon les possibilités, les nécessités et la méthode d'étalonnage.

La stabilité à long terme des systèmes de mesure les plus modernes, et des capteurs en particulier, évite dans la plupart des cas d'avoir à procéder à un étalonnage direct. Il y a également à prendre en compte le fait que, dans certains cas, les dépenses de travail et de matériel indispensables à l'exécution de ces étalonnages sur site sont trop élevées par rapport à l'importance limitée des mesures prévues.

En principe toutefois, les caractéristiques techniques telles que la sensibilité et la fréquence de tout l'appareillage de mesure devraient être révisées périodiquement par un étalonnage direct ou au moins après la fabrication, dans un laboratoire officiel ou dans le laboratoire du constructeur. Un certificat doit pouvoir être présenté sur demande.

7.2 *Etalonnage direct*

7.2.1 *Mesures de vibrations*

L'étalonnage s'effectue avant les essais dans la plage de fréquence et d'amplitude requise. Un excitateur spécial est utilisé pour l'étalonnage dynamique des capteurs à masse sismique. Les paramètres de vibration de l'excitateur (accélération, vitesse et déplacement) sont mesurés avec un dispositif optique ou avec un capteur de vibration de référence. Cette méthode s'applique essentiellement aux mesures de vibration en régime stabilisé. Pour la mesure des vibrations lors de transitoires, il faut prendre des précautions particulières; celles-ci sont exposées dans les Normes ISO 8042 et 5347. Dans la plupart des cas, il n'est pas possible d'effectuer ces étalonnages sur site, les dépenses en matériel étant trop élevées et le temps nécessaire trop long. Ces essais s'effectuent normalement dans des laboratoires spécialement équipés. Il y a lieu de pouvoir fournir des certificats d'étalonnages suffisamment récents.

Dans le cas où l'on utilise des capteurs de déplacement relatif, il convient d'effectuer un étalonnage statique direct en mesurant un déplacement avec un appareil de précision suffisante et en plaçant le capteur en regard de la surface réelle.

7.2.2 *Mesures de fluctuations de pression*

La pression d'étalonnage est appliquée au capteur par une presse hydraulique et comparée avec un manomètre de précision étalonné ou un manomètre à poids mort, ou par la charge statique d'une colonne d'eau de hauteur et de température connues (étalonnage statique). L'étalonnage dynamique des capteurs n'est habituellement pas possible sur site.

7.2.3 *Mesures de contraintes*

Un étalonnage direct n'est possible que si la mesure de déformation est utilisée comme une mesure de force. Toutefois, même dans ce cas, il est impossible, dans des conditions normales, d'effectuer ces étalonnages sur site. Il faut démonter la pièce équipée de jauges de

The calibration signals are to be recorded and/or stored using the same recorder and/or storage equipment as for the measurements.

One of the following two methods is normally used:

- direct calibration of the complete measuring channel including transducers, amplifiers, filter elements, connecting cables and recording instruments. In this method the calibration signal is produced by a direct excitation of the transducer in a well defined manner;
- calibration by electrical reference signals excludes normally only the transducer's signal, simulating the transducer by an accurately known electrical signal.

Static or dynamic calibration procedures may be used depending on possibilities, necessities and method of calibration.

The long-term stability of the most modern measuring systems and especially of the transducers makes it unnecessary to perform direct calibration in most cases. Also it should be taken into account that in some cases the necessary expenditure of work and equipment to perform these calibrations in the plant is too high for the limited importance of the planned measurement.

But in principle the technical data, e.g. sensitivity and frequency behaviour, of all measuring systems should be ascertained periodically by direct calibration or at least after manufacture in an official laboratory or in the manufacturer's laboratory. A certificate should be available.

7.2 *Direct calibration*

7.2.1 *Vibration measurements*

The calibration is performed prior to the test measurements in the required frequency and amplitude range. For transducers with seismic mass a special vibrostand is used for dynamic calibration. Vibration parameters of the vibrostand (acceleration, velocity and displacement) are measured with an optical device or with a reference vibrotransducer. This procedure is intended essentially for steady state vibration measurements. For transient vibration measurements, special precautions have to be taken, which are dealt with in ISO Standards 8042 and 5347. In most cases it is not possible to perform these calibrations on site because the expenditure on equipment is too large and the time needed for the calibration tests is too long. These tests are normally performed in specially equipped laboratories. Sufficiently recent certificates should be available.

If relative displacement transducers are used for the measurements a static direct calibration check should be performed by measuring an applied constant displacement with a device of sufficient accuracy and applying the transducer against the actual surface.

7.2.2 *Pressure pulsation measurements*

The calibration pressure is applied to the transducer by a hydraulic press and is compared with a calibrated precision manometer or dead weight manometer, or by the pressure due to a water column of known height and known temperature (static calibration). A calibration of the dynamic behaviour of the transducers cannot usually be performed on site.

7.2.3 *Stress measurements*

A direct calibration is possible only if the strain measurement is used for the measurement of a force. But also in this case it is impossible under normal circumstances to perform these calibrations on site. The part equipped with the strain transducers has to be removed and a

déformation, et lui appliquer une force connue, ce qui s'effectue normalement dans des laboratoires spécialement équipés.

Dans tous les autres cas, il faut procéder très scrupuleusement à un étalonnage avec des signaux de référence en tenant compte des caractéristiques techniques des jauges extensométriques.

7.2.4 *Mesures des fluctuations du couple sur l'arbre*

La mesure du couple sur les grosses machines ne peut normalement s'effectuer qu'avec une série de jauges extensométriques montées sur l'arbre de la machine (voir annexe B). Un étalonnage direct du dispositif de mesure n'est pas possible dans des conditions normales.

Un étalonnage statique approximatif, d'une précision suffisante, peut être obtenu en mesurant la puissance à la sortie de l'alternateur (ou entrée du moteur) à vitesse nominale et en calculant le couple sur l'arbre qui en résulte en tenant compte des pertes mécaniques et électriques.

7.2.5 *Mesures des fluctuations de la vitesse de rotation*

Etant donné le degré de précision pouvant être normalement obtenu dans les mesures de vitesse de rotation, il n'est pas possible de mesurer précisément les fluctuations de cette vitesse de rotation lors d'essais en régime stabilisé, car ces fluctuations sont souvent minimes en regard de la vitesse spécifiée. En revanche, la mesure des grandes variations de la vitesse de rotation en régime transitoire est assez fiable.

En temps normal, on ne procède pas à l'étalonnage direct de l'appareillage de mesure de la vitesse de rotation. La vérification statique de la concordance avec les indications du tableau de commande est considérée comme suffisante. Si nécessaire, les appareils de mesure peuvent être calibrés avec soit un générateur d'impulsions, soit un fréquence-mètre (avec des méthodes analogiques).

7.2.6 *Mesure des fluctuations de puissance*

L'étalonnage du matériel de mesure de la puissance électrique ne peut que rarement s'effectuer sur site. La vérification du bon branchement peut se faire par comparaison avec les indications données par le tableau de commande. Le matériel de mesure de la puissance électrique, wattmètres, voltmètres et ampèremètres, sont étalonnés dans les laboratoires spécialisés.

Un enregistrement continu est nécessaire pour les mesures de fluctuations; l'enregistreur doit être étalonné, en statique, à l'aide d'un wattmètre de précision en laboratoire, et sa fonction de transfert doit avoir été préalablement déterminée.

7.2.7 *Mesure des fluctuations de couple sur les directrices*

Il n'est généralement pas possible de procéder à un étalonnage statique direct. S'il s'agit d'une directrice équipée en usine, il est possible de procéder à l'étalonnage en cette usine ou dans un laboratoire spécialisé en appliquant un couple bien connu sur le tourillon (ou une force sur la bielle). (Voir annexe B.)

7.2.8 *Mesure de fluctuations de la poussée sur les paliers-guides ou butées*

L'étalonnage direct sur site n'est en général pas possible. On utilise souvent des dispositifs de mesure préparés en usine. Un étalonnage direct en usine est alors possible par application de forces bien connues sur les patins de palier utilisés pour la mesure. Dans certains cas, l'étalonnage est possible en soulevant le rotor par utilisation des freins, si l'arbre est vertical et que le poids du rotor soit bien connu.

known force has to be applied to it. This is normally done in specifically equipped laboratories.

In all other cases a calibration with reference signals has to be performed, carefully considering the technical data of the strain gauges.

7.2.4 *Shaft torque pulsation measurements*

Normally the measurement of torque in large machines can only be performed by an array of strain gauges applied to the shaft of the machine (see Appendix B). Under normal conditions a direct calibration of the measuring arrangement is not possible.

An approximate static calibration with sufficient accuracy may be performed by measuring the generator output (motor input) at nominal speed and calculating the resulting shaft torque considering the mechanical and electrical losses.

7.2.5 *Rotational speed pulsation measurements*

With the normally attainable accuracy in rotational speed measurements, rotational speed pulsations in steady state tests usually cannot be measured in a precise way, since they are often very small in comparison with the specified speed. On the contrary, large variations in rotational speed during transients can be measured with sufficient confidence.

Normally, no direct calibration of the equipment for the measurement of the rotational speed is necessary, a static check with the panel instrumentation being considered sufficient. If necessary, the instruments may be calibrated e.g. with a pulse train generator and/or a frequency meter (in analogue methods).

7.2.6 *Power pulsation measurements*

A calibration of the equipment for measurement of electrical power can seldom be done on site. A check of correct connection can be made by comparison with the switchboard meters. Equipment for the measurement of electrical power, wattmeters, volt- and amperemeters, normally are calibrated in specialized laboratories.

For the measurement of pulsations a continuous recording is necessary. The recorder should be calibrated using the readout of the laboratory calibrated precision wattmeters at steady state operation, its transfer function having been previously established.

7.2.7 *Guide vane torque pulsation measurements*

A direct static calibration on site cannot be performed under normal circumstances. If a factory prepared guide vane is used for this measurement a static calibration may be possible in factory or in a specialized laboratory, applying a well defined torque to the shaft (or force to the link). (See Appendix B.)

7.2.8 *Measurement of thrust pulsation at guide and thrust bearings*

A direct calibration on site cannot be performed under normal circumstances. Often factory prepared measuring arrangements are used. In these cases a static calibration in factory may be possible by applying well defined forces to the bearing segments used for the measurement. In some cases a calibration is possible by lifting up the rotor using the brakes in the case of a vertical shaft and accurately known rotor weight.

7.2.9 *Mesure de l'ouverture du distributeur (injecteur), des pales et des vannes*

Il est en général possible, et même pratique, d'étalonner de façon statique les capteurs directement sur le site après leur mise en place.

7.3 *Etalonnage par signaux électriques de référence*

Le capteur ne fait pas partie de cet étalonnage. Ses caractéristiques techniques doivent être connues par un étalonnage en laboratoire ou par indications du constructeur pour les capteurs fabriqués avec de faibles tolérances, comme les jauges extensométriques.

Un signal de référence statique ou dynamique produit de façon interne par l'amplificateur de mesure est habituellement utilisé pour l'étalonnage. On recourt dans certains cas à un signal de référence produit de façon externe.

7.3.1 *Mesure de vibrations*

Normalement, un générateur interne alimente un amplificateur en signaux électriques d'amplitude et de fréquence définies. On peut alors étalonner les ensembles d'amplification et d'enregistrement.

7.3.2 *Mesure des fluctuations de pression*

L'ensemble de l'amplificateur et du pont de mesure est normalement étalonné par des signaux statiques produits de façon interne et à polarité positive et négative. L'enregistreur est inclus dans cette procédure.

7.3.3 *Mesure de contraintes, mesure de déformations*

L'amplificateur, le pont de mesure et l'enregistreur sont étalonnés par des signaux statiques produits de façon interne.

7.3.4 *Mesure des fluctuations du couple sur l'arbre*

Puisqu'il s'agit, sur le principe, d'une mesure de déformation, voir 7.3.3.

7.3.5 *Mesure des fluctuations de la vitesse de rotation*

Un étalonnage indirect par un signal électrique de référence est possible, à condition que la sortie du capteur soit analogique.

7.3.6 *Mesure des fluctuations de puissance*

Seul l'enregistreur peut être étalonné, si la valeur de sortie de l'instrument de mesure est connue.

7.3.7 *Mesure des fluctuations du couple sur les directrices*

Voir 7.3.4.

7.3.8 *Mesure des fluctuations de poussée sur les paliers-guides et butées*

L'amplificateur, le pont et l'enregistreur sont étalonnés par des signaux statiques produits de façon interne. Il importe alors de connaître la relation liant le signal de sortie du capteur à la poussée, établie par des calculs ou des essais en laboratoire.

7.2.9 *Guide vane (needle) opening, runner blade angle, valve and gate opening measurements*

Generally, it is possible and also convenient to statically calibrate the position transducers used at site after their installation.

7.3 *Calibration by electrical reference signals*

The transducer is not included in this calibration. The technical data for it have to be known from laboratory calibration or as type data for transducers manufactured with small tolerances, e.g. strain gauges.

Usually a static or dynamic reference signal generated internally by the measuring amplifier is used for the calibration. In some cases an externally generated reference signal is used.

7.3.1 *Vibration measurements*

Normally an internal signal generator feeds an electrical signal of defined amplitude and of defined frequency to the amplifier input so that amplifier and recording instrument assemblies can be calibrated.

7.3.2 *Pressure pulsation measurements*

Normally the amplifier and bridge assembly is calibrated by static internally generated signals of positive and negative polarity. The recorder is included in the procedure.

7.3.3 *Stress measurements, strain measurements*

The amplifier, the bridge and the recorder are calibrated by internally generated static signals.

7.3.4 *Shaft torque pulsation measurements*

Since in principle this measurement is a strain measurement, see 7.3.3.

7.3.5 *Rotational speed pulsation measurements*

Indirect calibration by an electrical reference signal is possible when the output of the transducer is an analogue signal.

7.3.6 *Power pulsation measurements*

Only the recorder can be calibrated if the output of the measuring instrument is known.

7.3.7 *Guide vanes torque pulsation measurements*

See 7.3.4.

7.3.8 *Measurement of thrust pulsation at guide and thrust bearings*

The amplifier, the bridge and the recorder are calibrated by internally generated static signals. The relation between transducer output and thrust has to be known from calculations or laboratory tests.

8. Enregistrement

On peut effectuer un enregistrement direct à l'aide d'un appareil à bande papier ou bande magnétique ou un enregistrement numérique.

Par comparaison avec l'enregistrement manuel par lecture d'une graduation ou d'une indication numérique, l'enregistreur à bande papier, l'enregistreur à bande magnétique ou l'enregistrement numérique présentent les avantages suivants:

- l'enregistrement continu permet d'étudier le processus à des intervalles de temps courts, de l'ordre du temps de variation du signal;
- des processus transitoires très brefs peuvent être enregistrés;
- divers signaux peuvent être enregistrés simultanément puis comparés ultérieurement;
- le signal de mesure direct est stocké en vue d'une évaluation ou d'une vérification ultérieure;
- dans le cas de la bande magnétique et de l'enregistrement numérique, le signal de mesure peut être reproduit autant de fois que nécessaire pour de nouvelles études (analyse de crête ou de valeur efficace, analyse de fréquence, etc., par exemple).

La précision du système d'enregistrement doit correspondre, chaque fois que possible, à celle des instruments de mesure.

8.1 Enregistreurs graphiques

8.1.1 Types d'enregistreurs utilisables

Il est nécessaire d'utiliser un enregistreur doté d'une limite supérieure de fréquence adaptée à la fréquence utile maximale que comporte le signal.

Voici quelques exemples de types d'enregistreurs les plus répandus:

- enregistreur galvanométrique à système d'enregistrement optique ou à encre;
- enregistreur électronique à système d'enregistrement thermique ou électrostatique.

8.1.2 Choix de la vitesse d'écriture

La vitesse d'écriture est choisie conformément aux instructions données dans les manuels d'utilisation, avec la résolution temporelle souhaitée.

8.1.3 Choix de la vitesse de déroulement du papier et de la durée d'enregistrement

La durée d'enregistrement t_r est déterminée par la fréquence f_i de la composante considérée et par le nombre de cycles N_r à cette fréquence que doit comporter l'enregistrement. Il convient de calculer la durée d'enregistrement à partir de:

$$t_r = N_r \cdot \frac{1}{f_i} \quad (8)$$

Si la longueur de l'enregistrement correspondant à un cycle unique est l , alors la longueur totale de l'enregistrement sera:

$$L = N_r \cdot l \quad (9)$$

La vitesse de déroulement du papier devra donc être:

$$v_r = \frac{L}{t_r} = l \cdot f_i \quad (10)$$

Le nombre de cycles N_r que doit comporter un enregistrement dépend de la caractéristique du spectre et doit correspondre à la méthode d'analyse utilisée. La longueur l correspondant à un cycle doit normalement être choisie en fonction de l'épaisseur de la ligne de façon qu'un cycle d'oscillation puisse apparaître clairement sur le graphique.

8. Recording

Direct recording by strip chart recorder, magnetic tape or digital recording should be used.

In comparison with the manual recording of the read-out of a scale or digital instrument, direct recording by strip chart recorder, magnetic tape recorder or digital recording has the following advantages:

- by continuous recording the process can be investigated over short time intervals, of the order of the signal variation time;
- very short transient processes can be observed;
- various signals can be recorded simultaneously and can be compared later;
- the direct measuring signal is stored for later evaluation or check;
- in the case of magnetic tape and digital recording, the measuring signal can be played back as often as necessary for further investigations (e.g. peak or r.m.s. analysis, frequency analysis, etc.).

The accuracy of the recording system should be matched, whenever possible, to the accuracy of the measuring equipment.

8.1 Graphical recorders

8.1.1 Usable types of recorders

For the purpose of recording, it is necessary to use a recorder with an upper frequency limit appropriate to the highest frequency of interest contained in the signal.

Examples of the commonly used types of recorders are:

- galvanometric recorder with optical or ink recording system;
- electronic recorder with thermal or electrostatic recording system.

8.1.2 Selection of writing speed

The writing speed is selected in accordance with the instructions given in the instrument manuals and with the desired time resolution.

8.1.3 Selection of paper speed and recording time

The recording time t_r is determined by the component frequency f_i to be considered and the number of cycles N_r of this frequency which should be contained in the record. Recording time should be calculated from:

$$t_r = N_r \cdot \frac{1}{f_i} \quad (8)$$

If the length of the record corresponding to one cycle is l , then the total length of the record is:

$$L = N_r \cdot l \quad (9)$$

Then the required paper speed is:

$$v_r = \frac{L}{t_r} = l \cdot f_i \quad (10)$$

The number of cycles N_r to be contained in the record depends on the characteristic of the spectrum and shall correspond to the method of analysis used. The length l corresponding to one cycle should be chosen according to the line thickness, so that one oscillation cycle may be clearly made out on the graph.

8.2 *Enregistreurs à bande magnétique*

- 8.2.1 L'utilisation d'enregistreurs à bande magnétique permet de réaliser de multiples reproductions des signaux enregistrés et d'utiliser du matériel électronique et des calculateurs pour l'analyse.
- 8.2.2 La gamme de fréquences de l'enregistreur utilisé doit être plus grande que la plage à mesurer. Les systèmes FM (modulation de fréquence) sont préférables aux systèmes AM (modulation d'amplitude), le système FM permettant de partir de la fréquence zéro. Dans ce cas toutefois, il convient de porter une attention particulière à la fréquence supérieure limite de l'enregistreur FM. Il existe aussi un système d'enregistrement multipistes: MIC (modulation par impulsions codées). Les valeurs mesurées y sont enregistrées selon un code numérique.
- 8.2.3 Les enregistreurs multipistes doivent normalement disposer d'une piste distincte pour l'enregistrement d'une base de temps ou d'un autre repère ou bien encore d'un signal vocal pour être en mesure d'identifier n'importe quel point de la bande magnétique lors d'une analyse ultérieure.
- 8.2.4 Il convient d'utiliser les enregistreurs multipistes pour l'enregistrement simultané de plusieurs paramètres. Un oscilloscope électronique ou un enregistreur graphique relié aux amplificateurs de sortie de l'enregistreur doit normalement être utilisé pour le contrôle de l'enregistrement dans le cas où l'instrument est équipé d'un dispositif d'enregistrement et de lecture simultanés. Sinon, il convient de relire tous les enregistrements, à intervalles adéquats, sur un enregistreur graphique, afin de vérifier la qualité de l'enregistrement.
- 8.2.5 *Choix de la vitesse de déroulement de la bande*
Il faut choisir la vitesse de défilement de la bande conformément au manuel d'utilisation, en tenant compte de la fréquence significative maximale contenue dans le signal.

8.3 *Enregistrement numérique*

Les avantages spécifiques de l'enregistrement numérique sont les suivants:

- aucune dérive des points zéro à la reproduction;
- reproductibilité parfaite;
- stockage numérique des paramètres, par exemple valeurs d'étalonnage, facteurs de conversion, numéro de la voie de mesure, vitesse de scrutation, temps, etc.;
- sortie en valeurs physiques.

Il y a lieu que le nombre de bits nécessaires à la conversion analogique-numérique soit suffisamment élevé pour couvrir la plage dynamique des mesures.

8.3.1 *Enregistrement de données en série*

Ce type d'enregistrement ne convient qu'aux fonctionnements lents, quasi-stationnaires ou à un contrôle de fonctionnement (boucle sans fin).

On peut utiliser à cet effet plusieurs modes de stockage, à des vitesses d'enregistrement très variables.

8.3.2 *Enregistrement séquentiel des données*

L'enregistrement séquentiel convient particulièrement bien au stockage par blocs lors des fonctionnements transitoires. Après chaque mesure, les données saisies dans l'ordinateur sont transférées en mémoire.

8.2 *Magnetic tape recorders*

8.2.1 Use of magnetic tape recorders allows multiple reproduction of the recorded signals and makes it possible to use electronic equipment and computers for analysis.

8.2.2 The frequency range of the tape recorder employed should be wider than the range to be measured. FM (frequency modulated) systems are to be preferred to AM (amplitude modulated) systems as FM systems allow the frequency range to start from zero frequency. In this case, however, particular attention should be paid to the upper boundary frequency of the FM recorder. Also multichannel tape recording with the PCM (pulse code modulation) system is possible. The measured values are in this case recorded in a digital code.

8.2.3 Multichannel tape recorders should be provided with a separate channel for the recording of a time signal or another mark or voice signal so as to be able to identify any point on the magnetic tape in the subsequent analysis.

8.2.4 Multichannel tape recorders should be used for simultaneous recording of several parameters. An electronic oscilloscope or a graphical recorder connected to the output amplifiers of the tape recorder should be used for recording supervision if the instrument is equipped with a simultaneous record-playback feature. Otherwise, at suitable intervals all records have to be played back off-line on a strip chart recorder to check the quality of the recording.

8.2.5 *Selection of tape speed*

The tape speed has to be selected according to the instruction manual, taking into account the highest significant frequency in the signal.

8.3 *Digital recording*

The special advantages of digital data recording are:

- no drifting of the zero points on reproduction;
- perfect reproducibility;
- digital storage of parameters, such as calibration values, conversion factors, port selection, scanning rate, time, etc.;
- output in engineering values.

The number of bits for the A/D conversion should be sufficiently high to cover the dynamic analog to digital range of the measurements.

8.3.1 *Series data recording*

This type of recording is only suitable for slow, quasi-stationary operations or for supervision of operation (endless loop).

For data storage, several storage media can be used, with widely variable recording speeds.

8.3.2 *Sequential data recording*

Sequential recording is particularly suitable for storage of transient operations in blocks. After each measurement the data collected in the computer are transmitted to the data memory.

La durée maximale d'enregistrement T_{rm} est limitée par la capacité de stockage de la mémoire vive (RAM) du calculateur. Elle se calcule selon la formule suivante:

$$T_{rm} = \frac{C_s}{n_{ch} \cdot s_{rch} \cdot b_s}$$

où:

C_s = capacité de stockage en bytes de mémoire vive (RAM)

b_s = nombre de bytes par échantillon

n_{ch} = nombre de canaux

s_{rch} = taux d'échantillonnage par canal

Il faut tenir compte de cette limite lors de la préparation de l'instrumentation de mesure, la durée minimale d'enregistrement nécessaire étant fonction des grandeurs physiques mesurées et des analyses prévues.

- 8.3.3 Le taux d'échantillonnage de chaque canal doit être adapté aux exigences de mesure. Théoriquement, il ne doit pas être inférieur à 2,56 fois la fréquence maximale escomptée du signal ou la fréquence maximale d'intérêt, à condition que des filtres anti-repliement soient utilisés avant échantillonnage.

En pratique, il est recommandé de prévoir un taux d'échantillonnage au moins deux fois supérieur à la limite théorique.

Le taux d'échantillonnage global maximal du système est limité par la vitesse de scrutation maximale et éventuellement par le temps nécessaire à la conversion analogique-numérique.

- 8.3.4 Si une comparaison de phase entre les différents canaux est requise (voir 9.2.5), il convient de prendre des mesures adéquates pour, soit corriger le décalage temporel existant entre les différents canaux, soit le compenser. Ce décalage est introduit par la scrutation séquentielle des canaux.

9. Saisie et traitement des données

9.1 Généralités

Le niveau vibratoire et pulsatoire d'une machine hydraulique est évalué à partir des résultats des mesures de vibrations et de fluctuations réalisées aux points spécifiés en 5.2 et traitées de la façon suivante.

Il convient d'effectuer le traitement pour chaque point de fonctionnement stabilisé mentionné en 4.1 et de traiter les données relatives aux transitoires de telle sorte qu'aucune valeur crête significative ne soit négligée.

On peut ensuite apprécier la qualité d'une machine en comparant les résultats d'essai de vibrations et de fluctuations avec ceux qui ont été réalisés sur d'autres machines de même type et de même taille, selon la classification établie en 2.4; ou encore en les comparant à des courbes ou tableaux donnant une appréciation de la qualité, si ces courbes ou tableaux existent déjà pour ce type de machine (voir article 3).

On peut prétendre à une bonne appréciation de la qualité à condition qu'au cours des essais, tous les appareils de mesure aient fonctionné dans leur gamme d'utilisation, et que la reproductibilité des résultats d'essai ait été vérifiée chaque fois que possible.

Une première évaluation de la nature des vibrations peut s'effectuer par visualisation des données expérimentales en direct ou en différé, par exemple par défilement temporel sur l'écran d'un oscilloscope, ou selon le mode X—Y (figures de Lissajous). Il est recommandé de stocker les observations sur un support permanent (photographies ou sorties informatiques). Voir article 8 pour des informations plus détaillées sur l'enregistrement.

The maximum record time T_{rm} is limited by the storage capacity of the RAM (random access memory) of the computer. It may be calculated by the following formula:

$$T_{rm} = \frac{C_s}{n_{ch} \cdot s_{rch} \cdot b_s}$$

where:

C_s = storage capacity of RAM in bytes
 b_s = number of bytes per sample
 n_{ch} = number of channels
 s_{rch} = sampling rate per channel

This limitation has to be taken into account when planning the instrumentation of the measurement, since the minimum necessary record time depends on the measured physical quantities and on the analyses which are planned.

- 8.3.3 The sampling rate of each channel is to be adapted to the measuring requirements. Theoretically, it should be not less than 2.56 times the maximum frequency to be expected in the signal or the highest frequency of interest, provided suitable anti-aliasing filters are used before sampling.

In practice, it is advisable to provide for a sampling rate at least two times higher than the theoretical limit.

The maximum overall sampling rate of the system is limited by the maximum scanning rate and/or the time required for A/D conversion.

- 8.3.4 If phase comparison between different channels is required (see 9.2.5), proper measures should be taken to ensure the possibility either of correct relative time reference between the channels concerned or of compensating—if possible—for any time lag introduced by sequential scanning of the channels.

9. Data acquisition and processing

9.1 General

The level of vibration and pulsation of a hydraulic machine is assessed from the results of vibration and pulsation measurements taken at the locations specified in 5.2 and processed as specified below.

The processing should be accomplished for each steady state operating point mentioned in 4.1. For transients, the data should be processed so that no significant peak values are overlooked.

The quality of a machine can then be estimated by comparing the vibration or pulsation test results with those for other machines of the same type and size—as classified according to 2.4—or with “quality assessment” curves or tables, if such curves or tables are available for this hydraulic machine type (see clause 3).

An adequate estimation of quality can be ensured provided that during tests all elements of the vibration measuring system have operated within their respective operating range and repeatability of test results has been checked wherever possible.

The first direct assessment of the nature of vibration which is based on raw data can be accomplished by visualizing the measured vibration quantities “on line” or “off line”, e.g. on the display screen of an oscilloscope with time-dependent X-axis or in the X—Y mode of operation (Lissajous’ figures). It is recommended to store the observation on a permanent medium (e.g. photographs or computer print-outs). See clause 8 for more detail on recording.

On peut parvenir à une meilleure compréhension des phénomènes de vibrations ou de fluctuations en poursuivant le traitement des données. Le procédé d'évaluation consiste à mesurer et compter manuellement ou automatiquement les amplitudes et les fréquences respectives.

Normalement, la variation des niveaux de vibrations et de fluctuations en fonction du temps est enregistrée et les résultats sont présentés sous forme d'une fonction du temps sur une échelle linéaire ou logarithmique.

Cette méthode est rapide et convient particulièrement aux cas où les valeurs instantanées ne présentent aucun intérêt.

Pour la représentation numérique et la comparaison à une quelconque référence, des paramètres spécifiques sont obtenus en poursuivant le traitement des données ou en les saisissant numériquement et en les traitant, si des cadences d'échantillonnage suffisamment élevées peuvent être assurées.

Dans les cas où il est nécessaire de déterminer certaines valeurs de vecteur ou de tenseur pour bien comprendre la nature des vibrations (ou fluctuations), des calculs manuels ou assistés par ordinateur peuvent devenir nécessaires.

L'annexe A traite par exemple du calcul de l'amplitude et de la direction instantanées des contraintes principales à partir des mesures de déformation effectuées au moyen de jauges extensométriques appelées «rosettes».

Une attention particulière devant être portée au calcul de ces valeurs afin d'obtenir des résultats fiables et, par ailleurs, ce type d'évaluation n'étant faisable qu'avec un système informatique efficace, mieux vaut se limiter à l'indispensable.

9.2 *Choix des méthodes de traitement des données*

L'expérience acquise en matière de mesures de vibrations et de fluctuations dans les machines hydrauliques a montré que le signal étudié pouvait être traité comme la somme de deux types d'oscillations:

- oscillations périodiques (liées, par exemple, à la fréquence de rotation, à la fréquence de passage des aubes, à la fréquence de précession de vortex et autres), et
- oscillations aléatoires.

Pour le fonctionnement en régime stabilisé, on peut considérer cette somme d'oscillations comme un processus aléatoire stationnaire.

Le traitement des données mesurées dépend essentiellement de la méthode de mesure choisie et du but de l'essai.

Les méthodes de traitement des données couramment utilisées sont les suivantes:

1. Analyse des valeurs crête à crête ou crête.
2. Analyse des valeurs efficaces.
3. Traitement statistique des données.
4. Analyse de la densité spectrale de puissance.
5. Analyse spectrale complète, y compris analyse de phase.

9.2.1 *Analyse des valeurs crête à crête ou crête*

Les valeurs crête à crête ou crête sont étudiées pour indiquer le niveau des vibrations ou fluctuations en un point de mesure donné. Ces types d'analyse sont très répandus dans les essais de vibrations ou de fluctuations. Dans ce type d'analyse, seules les valeurs d'amplitude sont prises en considération en négligeant les fréquences. Ces méthodes sont rapides et conviennent particulièrement dans les cas où les valeurs crête sont constantes ou varient légèrement avec le temps et où aucune autre valeur instantanée ne présente d'intérêt.

A better understanding of the vibration or pulsation phenomena can be obtained from further processing of the data. The process of evaluation consists of manually or automatically measuring and counting amplitudes and respective frequencies.

Usually the variation of vibration and pulsation levels with time is recorded and the results are presented as a function of time on a linear or logarithmic scale.

This method is fast and especially convenient in cases where instantaneous values are of no interest.

For numerical representation and comparison with some reference, special parameters are found by further processing of data or by digital data acquisition and processing, if sufficiently high sampling rates can be ensured.

In cases where determination of some vector or tensor values is needed for adequate understanding of the nature of vibration (or pulsation), manual or computer-aided calculations become necessary.

For instance, Appendix A deals with the computation of instantaneous principal stress magnitudes and directions based on the strain measurements accomplished by means of strain gauge “rosettes”.

Since special care has to be exercised to obtain reliable results in the determination of such compound values and, since this kind of evaluation is feasible only with an efficient EDP system, one should confine oneself to what is indispensable.

9.2 *Selection of data processing methods*

Experience of vibration and pulsation measurement in hydraulic machines has shown that the oscillating signal in question can be treated as the sum of two types of oscillations:

- periodic oscillations (related e.g. to rotational, blade, precessing vortex, and other frequencies), and
- random oscillations.

For steady-state operating conditions this sum of oscillations can be considered as a stationary random process.

The processing of the measured data essentially depends on the chosen method of measurement and the purpose of the test.

Commonly used are the following data processing methods:

1. Peak-to-peak or peak value analysis.
2. Effective value analysis.
3. Statistical processing of data.
4. Power density spectral analysis.
5. Complete spectral analysis, including phase analysis.

9.2.1 *Peak-to-peak or peak value analysis*

The peak-to-peak values or the peak values of vibrations and pulsations are investigated to provide an indication of the level of the vibrations or pulsations at a given measuring point. These types of analysis are very often made for vibration or pulsation tests. In this kind of analysis only amplitude values are considered while frequencies are disregarded. The methods are fast and especially convenient in cases where peak values are constant or vary slightly with time and all other instantaneous values are of no interest.

L'analyse crête à crête utilise des fenêtres temporelles pour voir comment l'excursion maximale à court terme d'une grandeur oscillatoire varie avec le temps. Dans chaque fenêtre temporelle, l'excursion maximale absolue ΔX_{pp} (de la crête minimale à la crête maximale) de la grandeur oscillatoire est mesurée et enregistrée de façon adéquate.

Il convient également d'utiliser la méthode des fenêtres temporelles pour l'analyse des valeurs crête. Pour ce type d'analyse, la valeur absolue de l'écart maximal par rapport à la valeur moyenne de la grandeur oscillatoire est mesurée et enregistrée. Dans le cas d'une oscillation totalement symétrique par rapport à la valeur moyenne, la valeur crête ΔX_p est égale à:

$$\frac{\Delta X_{pp}}{2} \text{ soit la moitié de la valeur crête à crête.}$$

Deux procédures différentes sont suggérées pour l'analyse des valeurs crête à crête ou crête:

- l'une mieux adaptée au fonctionnement transitoire de la machine, où la fenêtre temporelle peut parfois être étendue pour englober toute la durée de l'enregistrement;
- l'autre mieux adaptée aux enregistrements effectués en régime stabilisé, où la durée totale de l'enregistrement de l'essai est subdivisée en fenêtres temporelles successives, chacune d'entre elles comportant quelques valeurs isolées d'excursion ou valeurs crête de la variable enregistrée.

Il est recommandé de présenter les résultats de l'analyse ci-dessus mentionnée soit sous forme d'histogramme des valeurs crête à crête ou crête en fonction des numéros progressifs des fenêtres temporelles, soit sous forme de tableau.

L'histogramme ou tableau ci-dessus mentionné peut parfois indiquer si le processus oscillatoire est essentiellement aléatoire ou s'il peut être considéré comme périodique.

Dans les cas où des maxima instantanés répétitifs (pics) caractérisent le processus oscillatoire, il convient de calculer la valeur moyenne des valeurs crête à crête ou crête sur un certain nombre des fenêtres temporelles, chacune comportant au moins un pic, pour servir de mesure du niveau global de vibration ou de fluctuation.

La valeur moyenne des pics ou, sinon, les résultats présentés dans l'histogramme ou le tableau, peuvent aider à déterminer s'il y a lieu d'analyser le processus oscillatoire en ce point de mesure de façon plus détaillée ou si l'on peut s'en tenir à l'analyse déjà effectuée.

Quant à savoir, de l'analyse crête à crête ou de l'analyse crête, laquelle convient le mieux pour étudier les vibrations et les fluctuations, c'est la nature de la variable mesurée et le but de la mesure qui permettent d'en décider.

Dans de nombreux cas, il est également nécessaire de déterminer la valeur moyenne (voir 2.3.3.1) de la variable mesurée et éventuellement les valeurs physiques du maximum et du minimum mesurés.

L'instrumentation la plus simple pour ce type d'analyse consiste en un appareil de mesure capable d'indiquer la valeur crête à crête ou crête du signal (voir figure 4).

La méthode selon laquelle s'effectue l'analyse dépend du système d'enregistrement utilisé si l'analyse n'est pas faite en temps réel.

Pour les enregistrements sur papier, l'analyse se fera manuellement, en mesurant les valeurs extrêmes (supérieures et inférieures) dans une fenêtre temporelle adéquate. Dans le cas d'enregistrement sur bande magnétique, l'analyse crête à crête se fait au moyen de deux voltmètres crête, l'un pour les maxima, l'autre pour les minima. Pour l'analyse de valeur crête, on peut utiliser un voltmètre crête mesurant les valeurs absolues avec compensation de la valeur moyenne ou bien un instrument spécial.

The peak-to-peak analysis employs time-frames to see how the short-term maximum excursion of an oscillating quantity varies with time. Within each time-frame the absolute maximum excursion ΔX_{pp} (from minimum to maximum peak) of the oscillating quantity is measured and recorded in a suitable way.

The time-frame method should also be used in peak value analysis. For this type of analysis the absolute value of the maximum deviation from the mean value of the oscillating quantity is measured and recorded. In the case of an oscillation which is totally symmetric about the mean value, the peak value ΔX_p is equal to

$$\frac{\Delta X_{pp}}{2}, \text{ i.e. half of the peak-to-peak value.}$$

Two different procedures are suggested for the peak-to-peak or the peak value analysis:

- one, more suitable for transient operation of the machine, where the time-frame may sometimes be enlarged to include the full length of the record;
- the other, more suitable for records obtained during steady-state operation of the machine, where the overall time of the test record is subdivided into successive time-frames, each time-frame containing a few individual excursions or peak values of the recorded variable.

It is recommended that the results of the above analysis be presented either in the form of a histogram of the peak-to-peak values or the peak values versus the progressive numbers of the successive time frames or in the form of a table.

The above-mentioned histogram or table can sometimes indicate whether the oscillatory process is essentially random or whether it can be treated as periodic.

In cases where repetitive sharp peaks ("spikes") are characteristic of the oscillatory process the average value of the peak-to-peak values or the peak values over a certain number of time-frames, each containing at least one sharp peak, should be calculated to serve as a measure of the general level of the vibration or pulsation.

The average value for sharp peaks or otherwise the results presented in the histogram or the table may provide an answer to the question of whether the oscillatory process at this measuring location should be analysed more comprehensively or whether the analysis already done will suffice.

Whether peak-to-peak analysis or peak value analysis is most suitable for the investigation of the vibrations or pulsations has to be decided from the nature of the measured variable and the purpose of the measurement.

In many cases it is also necessary to determine the mean value (see 2.3.3.1) of the measured variable and/or the physical values of the maximum and minimum measured.

The simplest instrumentation for these types of analyses consists of a measuring device capable of indicating peak-to-peak value or peak value of the signal (see Figure 4).

The method of performing the analysis depends on the recording system used if the analysis is not done on-line.

For strip-chart type recordings, the analysis will be carried out manually, measuring the upper and lower extreme values in an adequate time-frame. In the case of magnetic tape recordings, two peak voltmeters, one for maximum peaks and one for minimum peaks are used for peak-to-peak analysis. For peak-value analysis, one peak voltmeter measuring absolute values with compensation of the mean value or a special instrument can be used.

Lorsque les données sont stockées sous forme numérique, un programme informatique peut être utilisé pour ces évaluations.

9.2.2 Analyse des valeurs efficaces

Les valeurs efficaces utilisées dans ce paragraphe sont les valeurs efficaces rapportées à la moyenne, définies en 2.3.3.2 (appelées également écart type).

L'analyse des valeurs crête à crête est insuffisante dans les cas où le processus oscillatoire est essentiellement de nature aléatoire (le niveau global des vibrations varie considérablement avec le temps, des pics irréguliers se présentent). L'énergie mise en œuvre dans le processus pouvant constituer, dans ces cas, un paramètre critique pour l'évaluation de la sévérité des vibrations, l'analyse des valeurs efficaces devrait convenir.

Les résultats de l'analyse des valeurs efficaces doivent normalement être présentés sous forme de tableaux où apparaissent les valeurs efficaces (déplacement, vitesse ou accélération des vibrations, pression ou déformation, etc.).

Si le processus oscillatoire étudié est non stationnaire (en régime transitoire par exemple), il paraît préférable de l'enregistrer sur une bande magnétique ou sous forme numérique. L'enregistrement est relu et visualisé; puis il est scindé en fenêtres temporelles, à l'intérieur desquelles le signal peut être traité comme un signal aléatoire stationnaire, de la même façon que pour une analyse de valeur crête à crête (voir 9.2.1). Ces enregistrements partiels sont alors analysés* de façon à en déduire les valeurs efficaces sur des intervalles de temps adaptés aux caractéristiques de chaque enregistrement partiel.

9.2.3 Traitement statistique des données

Lors du fonctionnement en régime stabilisé d'une machine hydraulique, si l'analyse des valeurs crête à crête fait apparaître un processus oscillatoire essentiellement aléatoire, il peut être pratique de recourir à la notion de densité de probabilité pour décrire de façon compréhensible les vibrations et fluctuations et en évaluer le degré de sévérité.

La densité de probabilité se définit comme la probabilité de rencontrer des valeurs instantanées de la grandeur oscillatoire à l'intérieur d'un certain intervalle ΔX , divisé par la taille de cet intervalle (donc : densité).

La densité de probabilité à un niveau d'amplitude spécifié X est la suivante:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(X) - P(X + \Delta X)}{\Delta X}$$

$P(X)$ représente ici la probabilité d'occurrence de valeurs instantanées dépassant le niveau X et $P(X + \Delta X)$ celle de valeurs dépassant le niveau $X + \Delta X$.

En traçant la densité de probabilité pour toutes les valeurs de X , on obtient une courbe de densité de probabilité telle qu'une intégration de celle-ci de X_1 à X_2 donne immédiatement la probabilité d'occurrence des valeurs instantanées comprises dans un intervalle donné ($X_2 - X_1$).

La distribution statistique des maxima de vibrations ou de fluctuations (pics) peut de la même manière être décrite avec la courbe de densité de probabilité de pic, qui montre la probabilité d'occurrence de pics dans des «fenêtres» de faible amplitude à un niveau donné X de la grandeur oscillatoire.

* La méthode d'analyse des valeurs efficaces dépend du système d'enregistrement utilisé. Les enregistrements sur bande de papier ne conviennent pas à ce type d'évaluation. Pour les enregistrements sur bande magnétique, on peut utiliser un voltmètre de valeurs efficaces ou une instrumentation particulière. Lorsque les données sont stockées sous forme numérique, un programme informatique approprié doit être utilisé.

For digital data acquisition and storage a suitable computer program can be used for these evaluations.

9.2.2 *Effective value analysis*

The effective values used in this sub-clause are the ones referred to the mean as defined in 2.3.3.2 (also called standard deviation).

The peak-to-peak value analysis is insufficient in cases where the oscillating process is essentially random in nature (the general level of vibration substantially changes with time, irregular sharp peaks are occurring). Since in such cases the energy contained in the process may be a critical parameter for the assessment of the vibration severity, the effective value analysis should apply.

The results of the effective value analysis should be presented in a tabular form where levels of effective magnitude (displacement, velocity or acceleration for vibration; pressure or strain, etc.) should appear.

If the investigated oscillating process is non-stationary (for instance during transient operation), it should preferably be recorded on a magnetic tape or in digital storage. The record is displayed and investigated visually. Then the record is divided into time-frames where the signal can be treated as a stationary random signal, in a way similar to that already explained for peak-to-peak value analysis (see 9.2.1). These partial records are then analysed* so as to derive effective values over time intervals suitable to the characteristics of each partial record.

9.2.3 *Statistical processing of data*

For steady-state operation of a hydraulic machine where the peak-to-peak value analysis indicates that the oscillatory process is essentially random, it may be convenient to use the concept of probability density for a comprehensive description of the vibrations or pulsations and for the estimation of the severity of vibration or pulsation.

The probability density is defined as the probability of finding instantaneous values of the oscillating quantity within a certain amplitude interval ΔX , divided by the size of that interval (i.e. density).

The probability density at some specified amplitude level, X , is:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(X) - P(X + \Delta X)}{\Delta X}$$

Here $P(X)$ is the probability of occurrence of instantaneous values exceeding the level X and $P(X + \Delta X)$ is the probability of occurrence of instantaneous values exceeding the level $X + \Delta X$.

By plotting the value of probability density for all values of X a probability density curve is obtained which has the feature that integration of the curve from a value X_1 to a value X_2 gives the probability of occurrence of instantaneous amplitude values within the interval $(X_2 - X_1)$ directly.

The statistical distribution of maximum vibration or pulsation amplitudes (peaks) can be similarly described by means of the peak probability density curve which shows the probability of occurrence of peaks within small amplitude "windows" at a given level X of the oscillating quantity.

* The method of effective-value analysis depends on the recording system used. Strip-chart recordings are not suitable for this type of evaluation. For magnetic tape recordings an r.m.s. voltmeter or special instrumentation can be used. For digital data acquisition and storage suitable computer programs are used.

On peut en pratique obtenir la courbe de densité de probabilité avec un analyseur analogique ou numérique qui mesure les périodes de temps durant lesquelles le signal se trouve présent dans différentes fenêtres d'amplitude.

Pour obtenir la courbe de densité de probabilité de pic, l'analyseur est commuté pour compter le nombre de pics apparaissant dans différentes fenêtres d'amplitude.

Les courbes sont enregistrées sur un enregistreur adéquat.

Bien que les données de densité de probabilité n'indiquent que peu ou point l'historique ou les composantes de fréquence du processus à l'étude, elles n'en constituent pas moins des descriptions très utiles du signal et servent aux estimations des charges oscillatoires.

9.2.4 *Analyse de la densité spectrale de puissance*

Le traitement des données relatives aux vibrations et fluctuations, surtout dans le cas d'essais en régime stabilisé, a pour ultime objectif une analyse détaillée des composantes fréquentielles. Une bonne analyse spectrale des vibrations peut comporter une présentation simultanée des déplacements, vitesses et accélérations en fonction de la fréquence, sous la forme d'un graphique en coordonnées logarithmiques.

Une analyse spectrale peut être effectuée sur le signal selon deux techniques différentes:

- analyse de densité spectrale de puissance (avec analyseur soit analogique soit numérique);
- analyse par «transformation de Fourier rapide» (avec analyseurs numériques).

Dans ce dernier cas seulement, les informations de phase sont préservées.

Pour obtenir les résultats de l'analyse spectrale sous forme de densité spectrale de puissance, on peut utiliser différents types d'analyseurs de fréquence, tels qu'un analyseur à bande passante absolue constante ou un analyseur à bande passante relative constante*.

La gamme fréquentielle de l'analyseur devra couvrir la bande de fréquence analysée (f_L, f_U). Lorsque la limite inférieure de la gamme d'analyse en fréquence de l'analyseur est supérieure à la limite inférieure de la bande à analyser, le phénomène peut être enregistré avec un enregistreur magnétique à bande adapté à l'enregistrement d'oscillations à basse fréquence avec une vitesse de bande faible. Ensuite, l'enregistrement est reproduit à une vitesse supérieure et le phénomène est alors analysé avec l'analyseur.

Les analyseurs à bande passante relative constante sont à utiliser de préférence pour le traitement des signaux basse fréquence car ils sont généralement dotés d'une plus grande sélectivité dans la plage des basses fréquences.

Lorsqu'on utilise un enregistrement sur bande en vue d'un traitement ultérieur, il est bon de recourir à un analyseur en temps réel qui visualise le spectre.

9.2.5 *Analyse spectrale complète, y compris analyse de phase*

L'un des objectifs de l'analyse spectrale est d'indiquer la répartition de l'énergie du processus entre les différentes fréquences (voir 9.2.4); on cherche aussi parfois à étudier par ce moyen les relations entre deux grandeurs oscillatoires.

* Avec un analyseur à bande passante absolue constante, le spectre de puissance en fréquence qui en résulte est directement proportionnel à la densité spectrale de puissance. Avec un analyseur à bande passante relative constante, il convient d'appliquer la correction de fréquence:

$$G(f) = \frac{G_r(f)}{f}$$

à la valeur du spectre $G_r(f)$ donnée par l'analyseur pour obtenir la densité spectrale de puissance correcte $G(f)$ (voir 2.3.4.7). Cette correction est apportée graphiquement ou électriquement par un filtre spécial.

In practice, the probability density curve can be obtained by means of a probability density analogue or digital analyser which measures the time periods during which the signal is found within different amplitude windows.

To obtain the peak probability density curve, the analyser is switched to count the number of peaks falling within different amplitude windows.

The curves are recorded by means of a suitable signal level recorder.

Though probability density data give little or no information as to the time history or frequency content of the process being studied, they are very useful descriptions of the signal and are used for estimations of the oscillatory load.

9.2.4 *Power density spectral analysis*

The processing of measured vibration and pulsation data—especially for tests under steady state conditions—has the ultimate goal of obtaining a comprehensive analysis for component frequencies. A good spectral analysis of vibration can include simultaneous presentation of vibration displacements, velocities and accelerations versus frequency, e.g. in the form of a graph plotted using logarithmic coordinates.

Spectral analysis can be effected on the signal according to two different techniques:

- spectral power density analysis (either with analog or digital analysers);
- fast Fourier transform analysis (with digital analysers).

Only in the last case is phase information preserved.

For obtaining the results of spectral analysis in the form of spectral power density, different types of frequency analysers can be used, for instance constant absolute pass bandwidth analyser and constant relative pass bandwidth analyser*.

The frequency range of the analyser should cover the investigated range (f_L , f_U). When the lower limit of the analyser frequency range is higher than the lower limit of the investigated range, the process may be recorded by means of a magnetic tape recorder suitable for the recording of low frequency oscillations at low tape speed. Then the record is played back at a higher tape speed and the process is analyzed by the available analyser.

The constant relative pass bandwidth analysers should preferably be used for the treatment of low frequency signals as they generally provide higher selectivity in the low frequency range.

When a tape record is used for subsequent data processing, a real-time analyser which can display the spectrum is convenient for use.

9.2.5 *Complete spectral analysis, including phase analysis*

Spectral analysis provides information about the distribution of the energy of the process among the different frequencies (see 9.2.4). It is sometimes also desired to investigate by this means the relation between two different oscillating quantities.

* If a constant absolute pass bandwidth analyser is used the resultant power frequency spectrum is directly proportional to spectral power density. When employing a constant relative pass bandwidth analyser, the frequency correction:

$$G(f) = \frac{G_r(f)}{f}$$

should be applied to the spectrum value $G_r(f)$ obtained by means of the analyser in order to get correct power spectral density $G(f)$ (see 2.3.4.7). This correction is introduced graphically or electrically by means of a special filter.

Toutefois, si seule la densité spectrale à chaque fréquence est considérée comme dans l'analyse simple de densité spectrale de puissance (9.2.4), une partie de l'information contenue dans le signal est perdue.

Dans l'ignorance de la phase de chaque composante du signal, il est impossible de reconstruire, à partir du spectre, l'évolution temporelle d'origine de ce signal; on perd également des informations utiles à l'établissement d'éventuelles relations entre signaux issus de différents capteurs à la même fréquence.

Des informations exhaustives (donc la possibilité, en principe, d'effectuer le passage inverse du domaine fréquence au domaine temporel, et la possibilité de chercher une relation de phase entre composantes de différents signaux à une même fréquence) sont préservées en effectuant l'analyse spectrale complète, y compris «l'analyse de phase». Pour chaque fréquence f , ce n'est alors plus seulement une densité $W(f)$ qui est considérée, mais aussi une phase $\varphi(f)$.

La valeur de la densité spectrale à une fréquence donnée peut donc être considérée comme une grandeur complexe ou vectorielle*:

$$\vec{W}(f) = \{ W(f) \cos \varphi(f), W(f) \sin \varphi(f) \}$$

Ces informations peuvent être fournies par le ou les signaux soit en utilisant des dispositifs analogiques munis de filtres et des dispositifs multiplicateurs et intégrateurs, soit par traitement numérique du ou des signaux (FFT: transformation rapide de Fourier). Ce type de traitement numérique peut introduire des erreurs ou une modification du spectre, source d'erreur si elle est mal interprétée.

On peut obtenir $\vec{W}(f)$ pour un signal unique (densité spectrale) ou pour deux signaux (densité spectrale croisée).

Les phases $\varphi(f)$ n'ont bien sûr qu'une signification relative et non absolue.

10. Incertitudes de mesure

Avant de procéder à une évaluation, surtout s'il s'agit d'une évaluation automatique, il faut s'assurer, par contrôle visuel ou sortie graphique, que les enregistrements n'ont subi aucune altération. Si tel est cependant le cas («pics» provoqués par des interférences électromagnétiques par exemple), l'évaluation automatique devient difficile, et une évaluation manuelle devra être effectuée avec un soin particulier.

- 10.1 Les incertitudes de mesure de toutes les grandeurs variant en fonction du temps doivent être évaluées sur la base des courbes d'étalonnage obtenues directement ou fournies par le constructeur, en tenant compte des caractéristiques des capteurs, amplificateurs, filtres, enregistreurs, unités de traitement des données, etc.
- 10.2 Les incertitudes de mesure des grandeurs descriptives des conditions de fonctionnement (énergie hydraulique massique, puissance, ouverture du distributeur (injecteur), position des pales de la roue, énergie massique nette à l'aspiration) sont calculées selon les recommandations de la Publication CEI 000**.

* Dans l'analyse spectrale simple, la densité spectrale $G(f)$ d'un signal unique (9.2.4) coïncide avec le module de la densité $\vec{W}(f)$: $G(f) = |W(f)|$.

Il est parfois avantageux de considérer que $\vec{W}(f)$ est la transformée de Fourier de la fonction de corrélation (fonction d'autocorrélation pour un signal unique, fonction d'intercorrélation pour deux signaux). Les deux descriptions sont donc équivalentes.

** Actuellement document 4 (Bureau Central) 48.

However, if only the power spectral density at every given frequency is derived, as in simple power density spectral analysis (9.2.4), a part of the information content of the signal is lost.

Without knowledge of the phase of each component, indeed, it is not possible to reconstruct from the spectrum the original time-history of the signal(s); we also lose information useful for judging possible linkage of components of different variables at the same frequency.

Complete information (hence the possibility, in principle, to effect the inverse passage from the frequency-domain description to the time-history of the signal(s), and the possibility to look for phase relationship between components of different signals at the same frequency) is preserved by effecting the complete spectral analysis, including “phase analysis”. For every frequency f , in this case, not only a density $W(f)$ is derived, but also a phase $\phi(f)$.

The spectral density at a given frequency can thus be regarded as a complex, or a “vector”, quantity*:

$$\vec{W}(f) = \{ W(f) \cos \phi(f), W(f) \sin \phi(f) \}$$

This information can be obtained from the signal(s) either using analogue devices with filters, multipliers and integrating devices, or by digital processing of the signal(s) (FFT: Fast Fourier Transform). This kind of digital treatment can introduce biases or smearing in the spectrum which can be misleading if not correctly interpreted.

One can obtain $\vec{W}(f)$ for a single signal (spectral density) or for two signals (cross spectral density).

Of course the phases $\phi(f)$ have only a relative — and not an absolute — meaning.

10. Measurement uncertainties

Prior to evaluation, especially prior to automatically performed evaluation, one has to make sure, e.g. by visual checking of graphical recording, that the recordings are free from disturbances. In the case of disturbances (e.g. “spikes” caused by electromagnetic interference) automatic evaluation is difficult to perform and manual evaluation has to be carried out with special care.

- 10.1 The uncertainties in measurement of all the time-varying quantities have to be evaluated on the basis of the calibration curves directly determined or provided by the manufacturer, taking into consideration the features of transducers, amplifiers, filters, recorders, data processing units, etc.
- 10.2 The uncertainties in measurement of the quantities describing operating conditions (specific hydraulic energy, power, guide vane (needle) opening, runner blade angle, net positive suction specific energy) are calculated according to IEC Publication 000**.

* The spectral density $G(f)$ derived in the simple spectral analysis of one single signal (9.2.4) is coincident with the modulus of the density amplitude $\vec{W}(f)$, i.e. $G(f) = |\vec{W}(f)|$.

It is sometimes of advantage to consider that $\vec{W}(f)$ is the Fourier transform of the correlation function (auto-correlation function for a single signal, cross-correlation function for two signals). The two descriptions are thus equivalent.

** At present Document 4 (Central Office) 48.

- 10.3 L'acceptabilité des incertitudes de mesure, confirmée par l'examen d'oscillogrammes ou d'une quelconque autre façon, doit faire l'objet d'un accord entre les parties concernées, en vue de s'assurer qu'il y a cohérence entre les possibilités de l'instrument de mesure, la qualité de l'étalonnage, l'incertitude maximale prévue du canal de mesure et, enfin, les limites admissibles des vibrations ou fluctuations à évaluer, si celles-ci sont spécifiées.
- 10.4 Il y a lieu de calculer les incertitudes relatives des paramètres particuliers à utiliser dans l'évaluation à partir des erreurs relatives des grandeurs physiques impliquées dans leur définition mathématique, selon les règles classiques de la théorie des erreurs.

11. Rapport final

Le rapport final (voir annexe C) comportera, éventuellement dans un ordre différent, les indications suivantes:

- a) objet des essais et identification des principales caractéristiques de la machine;
- b) programme des essais et accords préliminaires s'y appliquant;
- c) personnel participant aux essais;
- d) conditions d'essais: énergie hydraulique massique, puissance de l'alternateur ou du moteur, NPSE, ouverture du distributeur (ou des injecteurs), position des pales de la roue, vitesse de rotation, etc.;
- e) description de l'instrumentation avec indication du fabricant, du type, du numéro de série, du coefficient d'étalonnage; description des procédures d'essai et de traitement des données;
- f) description et repérage de l'emplacement des capteurs; indication des emplacements sur un schéma d'ensemble de la machine;
- g) diagrammes utilisés au cours du traitement des données (étalonnage et divers);
- h) résultats des essais sous forme de texte, tableaux et diagrammes, exemples d'enregistrements;
- i) indication des incertitudes de mesure;
- j) conclusions et recommandations.

- 10.3 The acceptability of measurement uncertainties, confirmed by the examples of oscillograms or in some other way, should be agreed with the concerned parties, with a view to ensuring that there is consistency between: rating of the instrument, quality of calibration, maximum expected inaccuracy of measuring channel and admissible limits of the vibrations or pulsations to be evaluated, if specified.
- 10.4 Relative uncertainties in special parameters to be used in evaluation should be computed from relative errors of physical quantities involved in their mathematical definition according to the usual rules of error theory.

11. Final report

The final report (see Appendix C) shall contain, but not necessarily in this order, the following indications:

- a) object of tests and identification of main data of the machine;
 - b) test programme and preliminary agreements pertinent to the tests;
 - c) personnel taking part in the tests;
 - d) test conditions (specific hydraulic energy, generator or motor power, NPSE, opening of guide vanes or of needles, angle of runner blades, rotational speed, etc.);
 - e) description of instrumentation with indication of manufacturer, type, serial number, calibration coefficient, description of test procedure and data processing;
 - f) description of transducer locations given in written and in graphic form; indication of the locations on an overall drawing of the machine;
 - g) diagrams used during data processing (calibration and others);
 - h) test results in the form of text, tables and diagrams, examples of records;
 - i) statement as to inaccuracy of measurement;
 - j) conclusions and recommendations.
-

ANNEXE A

FORMULES DE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES ET DE TRAITEMENT DES SIGNAUX DANS LES MESURES DE DÉFORMATIONS DYNAMIQUES À L'AIDE DE ROSETTES

A1. Formules de calcul des contraintes principales

Les contraintes principales ne sont pas obtenues directement mais calculées à partir de déformations mesurées. Les formules à utiliser pour différents états de contraintes sont les suivantes:

A1.1 Contrainte uniaxiale

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0$$

où:

σ_0 = contrainte calculée
 E = module de Young
 ε_0 = déformation mesurée



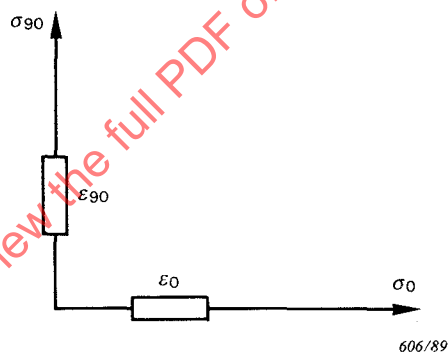
A1.2 Contrainte plane, directions des contraintes principales connues

$$\sigma_0 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_0 + \nu \varepsilon_{90})$$

$$\sigma_{90} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{90} + \nu \varepsilon_0)$$

où:

ν = coefficient de Poisson



A1.3 Contrainte plane, directions des contraintes principales inconnues

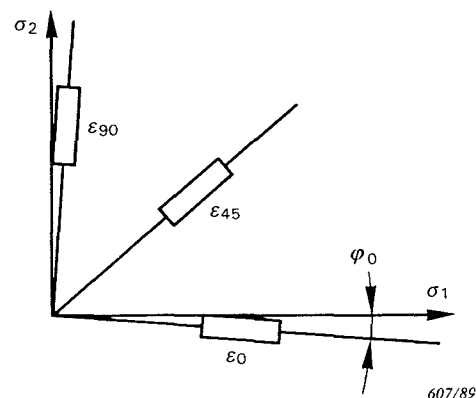
Il convient, dans ce cas, d'installer des «rosettes» tridirectionnelles au point étudié. Il existe différents types de rosettes (45°, 60°, 120°) et les formules correspondantes sont les suivantes:

A1.3.1 Rosettes à 45°

$$\operatorname{tg} 2 \varphi_0 = \frac{2 \varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2 \cos 2 \varphi_0} =$$

$$= \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}$$



où:

φ_0 = angle algébrique entre l'axe de la jauge à 0° et la direction de la contrainte maximale σ_1
 σ_1 = contrainte principale maximale
 σ_2 = contrainte principale minimale

APPENDIX A

FORMULAE FOR CALCULATING PRINCIPAL STRESSES
AND SIGNAL PROCESSING FOR DYNAMIC STRAIN MEASUREMENTS
WITH ROSETTES

A1. Formulae for calculating principal stresses

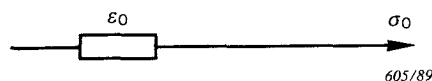
The principal stresses are not obtained directly but calculated from measured strains. Under different stress conditions, the formulae to use are:

A1.1 For uniaxial stress condition

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0$$

where:

σ_0 = calculated stress
 E = Young's modulus
 ε_0 = measured strain

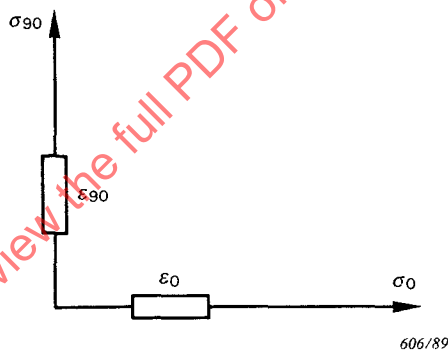
**A1.2 For plane stress condition when directions of principal stresses are known**

$$\sigma_0 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_0 + \nu \varepsilon_{90})$$

$$\sigma_{90} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{90} + \nu \varepsilon_0)$$

where:

ν = Poisson's ratio

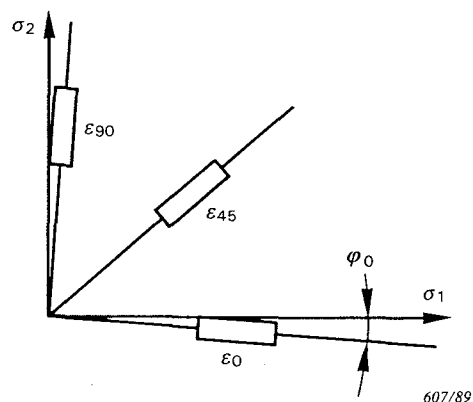
**A1.3 For plane stress condition when directions of principal stresses are unknown**

In this case "rosettes" of three gauges must be installed at the investigated point. Different types of "rosettes" (45°, 60°, 120°) are available and the corresponding formulae are:

A1.3.1 45° rosettes

$$\operatorname{tg} 2 \varphi_0 = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}$$

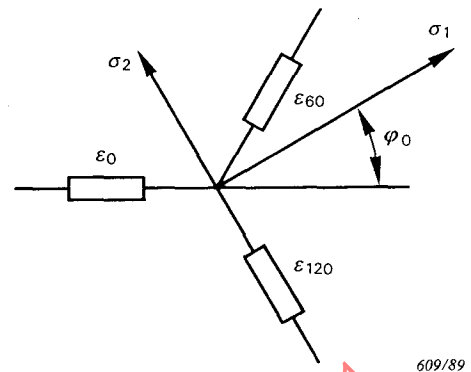
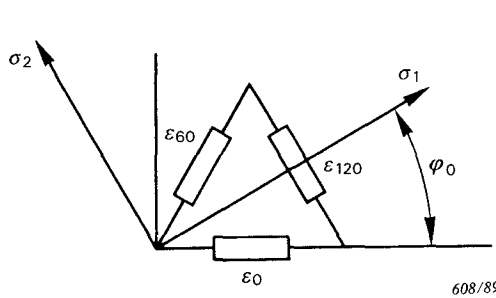
$$\begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2 \cos 2 \varphi_0} = \\ &= \frac{E}{1 - \nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \end{aligned}$$



where:

φ_0 = algebraic angle between the axis of the gauge at 0° and the direction of maximum stress σ_1
 σ_1 = maximum principal stress
 σ_2 = minimum principal stress

A1.3.2 Rosettes à 60° et à 120°



$$\operatorname{tg} 2 \varphi_0 = \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{2 \varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})}$$

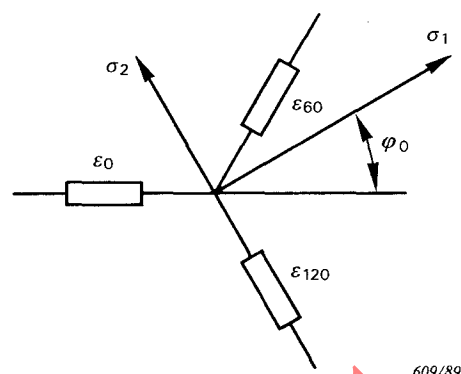
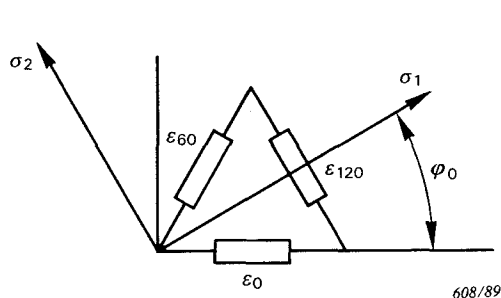
$$\begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60})^2 + (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})^2 + (\varepsilon_{120} - \varepsilon_0)^2} = \\ &= \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{2 \varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})}{3 \cos 2 \varphi_0} \end{aligned}$$

A2. Traitement des signaux dans les mesures de déformations dynamiques effectuées avec des rosettes

Le traitement des signaux des mesures de déformations dynamiques effectuées avec des rosettes peut se faire principalement de deux façons, selon les méthodes suivantes:

- traitement des signaux analogiques sur un calculateur analogique;
- échantillonnage parallèle et conversion analogique-numérique des signaux fournis par les trois jauges de chaque rosette. Traitement des données sur un calculateur numérique.

A1.3.2 60° rosettes and 120° rosettes



$$\tan 2 \varphi_0 = \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{2 \varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60})^2 + (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})^2 + (\varepsilon_{120} - \varepsilon_0)^2} = \\ &= \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{2\varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})}{3 \cos 2 \varphi_0} \end{aligned}$$

A2. Signal processing for dynamic strain measurements with rosettes

The signal processing for dynamic strain gauge measurements with rosettes can be done in two principal ways using the following methods:

- processing the analogue signals on an analogue computer;
- parallel sampling and A/D conversion of the signals from the three signals of each rosette. Processing of the data on a digital computer.

A2.1 Méthode analogique

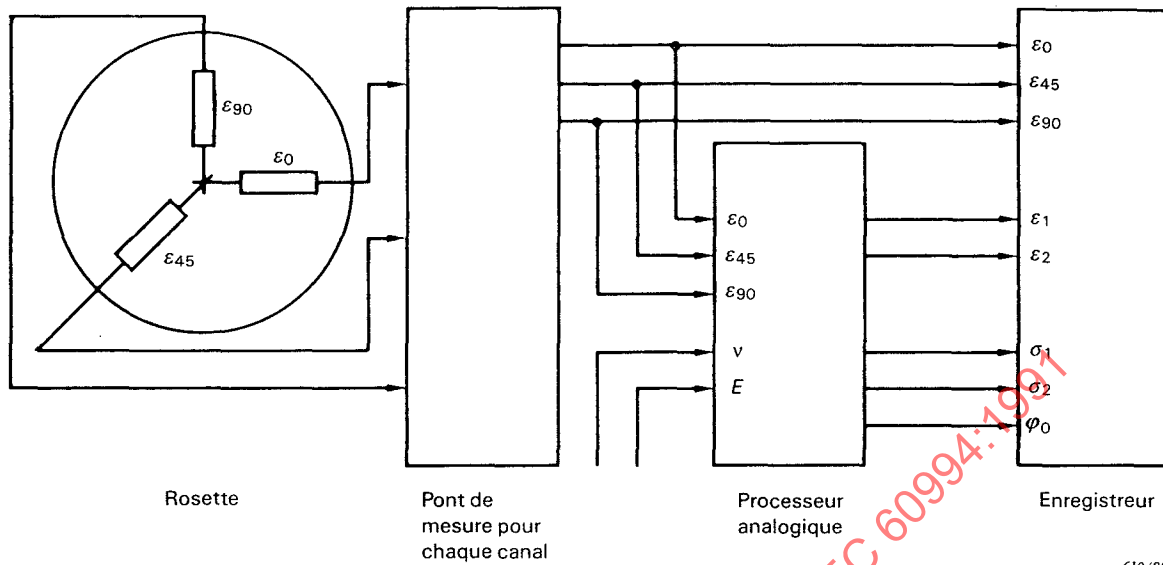


FIG. A1. — Schéma de disposition pour le traitement analogique en ligne des signaux issus d'une rosette.

La figure A1 présente un schéma de disposition destiné au traitement analogique des signaux de déformation fournis par une rosette. Le calculateur analogique doit être en mesure d'effectuer les opérations correspondant aux formules données en A1.3.

La fréquence maximale analysée (dans le cas d'un traitement en ligne) est limitée par la vitesse du calculateur et de l'appareillage de conditionnement des signaux.

Dans cette figure, les dispositifs de stockage et d'affichage des signaux donnés par les capteurs (voir figure 4, article 6) ne sont pas représentés.

A2.1 Analogue method

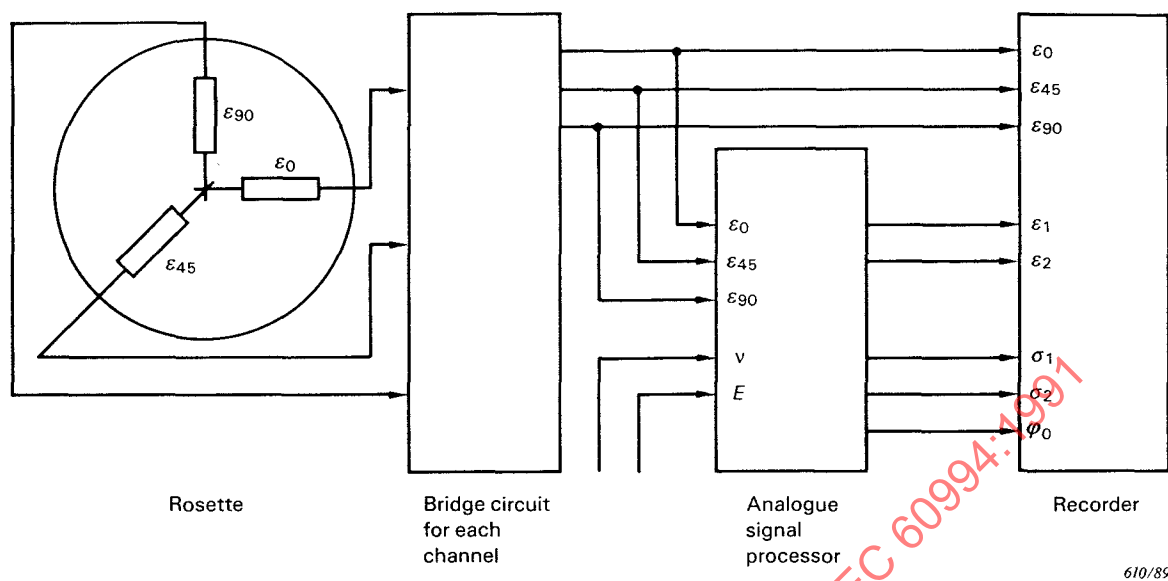


FIG. A1. — Schematic arrangement for analogue on-line processing of rosette strain data.

Figure A1 is a diagram of an arrangement for the analogue processing of the strain signals of a rosette. The analogue computer has to be able to carry out the operations corresponding to the formulae given in A1.3.

The maximum analysed frequency (in case of on-line processing) is limited by the speed of the signal processor and the signal-conditioning equipment.

In the figure, provisions in the measurement chain for storage and display of the transducer signal (see Figure 4, clause 6) are not shown.

A2.2 Méthode numérique

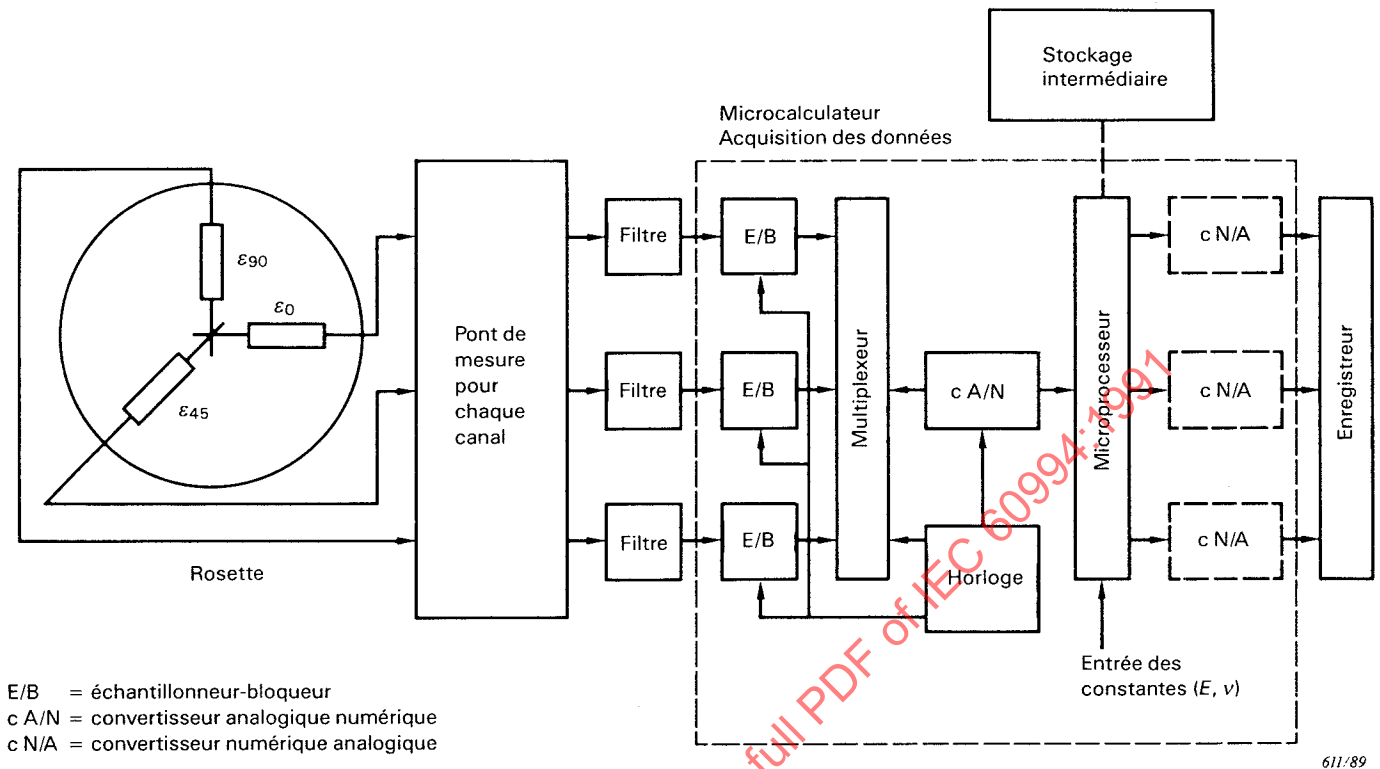


FIG. A2. — Schéma de disposition pour le traitement numérique en ligne des signaux issus d'une rosette.

La figure A2 donne un schéma de disposition pour traitement numérique des signaux de déformation fournis par une rosette. La cadence d'échantillonnage et, partant, la fréquence maximale des signaux, est limitée, dans le cas d'un traitement en ligne, par la vitesse de traitement. Un échantillonnage parfaitement simultané des canaux est indispensable. Des filtres passe-bas analogiques sont nécessaires pour éviter les erreurs de repliement («aliasing»).

Le produit de ce traitement analogique (figure A1) ou numérique (figure A2) est les valeurs instantanées de σ_1 , σ_2 et leur orientation instantanée, φ_0 ; en fonction de l'utilisation prévue de ces grandeurs, il peut être nécessaire de poursuivre le traitement.