

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Pelton hydraulic turbines – Model acceptance tests

Turbines Pelton – Essais de réception sur modèle

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Pelton hydraulic turbines – Model acceptance tests

Turbines Pelton – Essais de réception sur modèle

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.140

ISBN 978-2-8322-9236-5

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

CONTENTS

FOREWORD.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references	12
3 Terms, definitions, symbols and units	12
3.1 General.....	12
3.2 Terms and definitions.....	12
3.3 Units.....	14
3.4 Terms, definitions, symbols and units	14
3.4.1 List by topics	14
3.4.2 Subscripts and symbols	15
3.4.3 Geometry	16
3.4.4 Physical quantities and properties	17
3.4.5 Discharge, velocity and speed	18
3.4.6 Pressure.....	18
3.4.7 Specific energy.....	19
3.4.8 Height and head	19
3.4.9 Power and torque	20
3.4.10 Efficiency.....	22
3.4.11 Fluctuating quantities	22
3.4.12 Fluid dynamics and scaling.....	25
3.4.13 Dimensionless terms and definitions.....	25
3.4.14 Additional performance data	26
4 Physical properties	26
4.1 General.....	26
4.2 Acceleration due to gravity.....	26
4.3 Physical properties of water	27
4.3.1 Density of water.....	27
4.3.2 Kinematic viscosity	30
4.3.3 Vapour pressure	30
4.4 Physical conditions of atmosphere	31
4.4.1 Density of dry air	31
4.4.2 Ambient pressure	31
4.5 Density of mercury.....	31
5 Requirements of tests.....	32
5.1 Requirement of test installation and model.....	32
5.1.1 Choice of laboratory	32
5.1.2 Test installation	32
5.1.3 Model requirements	33
5.2 Dimensional check of model and prototype	35
5.2.1 General	35
5.2.2 Explanation of terms used for model and prototype.....	36
5.2.3 Purpose of dimensional checks.....	36
5.2.4 General rules.....	36
5.2.5 Procedure.....	37
5.2.6 Methods	38
5.2.7 Accuracy of measurements.....	41
5.2.8 Dimensions of model and prototype to be checked	41

5.2.9	Permissible maximum deviations in geometrical similarity between prototype and model	43
5.2.10	Surface waviness and roughness	44
5.3	Test procedures	46
5.3.1	Organization of tests	46
5.3.2	Inspections and calibrations	48
5.3.3	Execution of tests	50
5.3.4	Faults and repetition of tests	54
5.3.5	Preliminary test report	55
5.3.6	Final test report	55
6	Data acquisition	55
6.1	Data acquisition and data processing	55
6.1.1	General	55
6.1.2	General requirements	56
6.1.3	Data acquisition	56
6.1.4	Component requirements	58
6.1.5	Check of the data acquisition system	61
6.2	Data acquisition and processing for measurement of fluctuating quantities	63
6.2.1	General	63
6.2.2	Data acquisition	64
6.2.3	Data processing	66
6.3	Error analysis	67
6.3.1	Definitions	67
6.3.2	Determination of uncertainties in model tests	69
7	Methods of measurement	74
7.1	Discharge measurement	74
7.1.1	General	74
7.1.2	Choice of the method of measurement	75
7.1.3	Accuracy of measurement	75
7.1.4	Primary methods	76
7.1.5	Secondary methods	77
7.2	Pressure measurement	80
7.2.1	General	80
7.2.2	Choice of pressure-measuring section	80
7.2.3	Pressure taps and connecting lines	81
7.2.4	Apparatus for pressure measurement	84
7.2.5	Calibration of pressure measurement apparatus	90
7.2.6	Vacuum measurements	91
7.2.7	Uncertainty in pressure measurements	91
7.3	Free water level measurement (see also ISO 4373)	91
7.3.1	General	91
7.3.2	Choice of water level measuring sections	92
7.3.3	Number of measuring points in a measuring section	92
7.3.4	Measuring methods	92
7.3.5	Uncertainty in free water level measurement	93
7.4	Shaft torque measurement	94
7.4.1	General	94
7.4.2	Methods of torque measurement	94
7.4.3	Methods of absorbing/generating power	95

7.4.4	Layout of arrangement.....	95
7.4.5	Checking of system	99
7.4.6	Calibration	100
7.4.7	Uncertainty in torque measurement (at a confidence level of 95 %)	100
7.5	Rotational speed measurement.....	102
7.5.1	General	102
7.5.2	Methods of speed measurement	102
7.5.3	Checking	102
7.5.4	Uncertainty of measurement	102
8	Test execution and results.....	102
8.1	General.....	102
8.2	Determination of E	103
8.2.1	General	103
8.2.2	Determination of the specific hydraulic energy E	103
8.2.3	Simplified formulae for E	106
8.3	Determination of power and efficiency	108
8.3.1	Hydraulic power.....	108
8.3.2	Mechanical power.....	109
8.3.3	Hydraulic efficiency	109
8.4	Hydraulic similitude.....	110
8.4.1	Theoretical basic requirements and similitude numbers	110
8.4.2	Conditions for hydraulic similitude as used in this document.....	110
8.4.3	Similitude requirements for various types of model tests.....	111
8.4.4	Reynolds similitude.....	111
8.4.5	Froude similitude	111
8.4.6	Other similitude conditions - Weber number.....	111
8.5	Test conditions	112
8.5.1	Determination of test conditions.....	112
8.5.2	Minimum values for model size and test conditions to be fulfilled	112
8.5.3	Stability and fluctuations during measurements	113
8.5.4	Adjustment of the operating point	113
8.6	Computation and presentation of test results	113
8.6.1	General	113
8.6.2	Power, discharge and efficiency in the guarantee range	114
8.6.3	Computation of steady-state runaway speed and discharge.....	118
9	Nature and extent of guarantees related to hydraulic performance	119
9.1	General.....	119
9.1.1	Design data and coordination	119
9.1.2	Definition of the hydraulic performance guarantees	120
9.1.3	Guarantees of correlated quantities	120
9.1.4	Form of guarantees	120
9.2	Main hydraulic performance guarantees verifiable by model test.....	121
9.2.1	Guaranteed quantities for any machine.....	121
9.2.2	Specific application.....	121
9.3	Guarantees not verifiable by model test	121
9.3.1	Guarantees on cavitation erosion	121
9.3.2	Guarantees on maximum momentary overspeed and maximum momentary pressure rise	121
9.3.3	Guarantees covering noise and vibration	122

9.3.4	Measurements not covered by this document	122
9.4	Comparison with guarantees	122
9.4.1	General	122
9.4.2	Interpolation curve and total uncertainty bandwidth	122
9.4.3	Power, discharge and/or specific hydraulic energy and efficiency in the guarantee range	123
9.4.4	Prototype mechanical losses	124
9.4.5	Runaway speed and discharge	124
9.4.6	Penalty and premium	125
10	Additional performance data – Methods of measurement and results	125
10.1	Additional data measurement	125
10.1.1	General	125
10.1.2	Test conditions and test procedures	126
10.1.3	Uncertainty in measurements	126
10.1.4	Model to prototype conversion	127
10.2	Hydraulic loads on control components	127
10.2.1	General	127
10.2.2	Pelton needle force and deflector torque	128
10.3	Influence of tail water level	131
10.4	Testing in an extended operating range	131
10.4.1	General	131
10.4.2	Scope of tests	131
10.4.3	Methods of testing in the extended operating range	132
10.5	Differential pressure measurement in view of prototype index test	133
10.5.1	General	133
10.5.2	Purpose of test	133
10.5.3	Execution of test	133
10.5.4	Analysis of test results	134
10.5.5	Transposition to prototype conditions	135
10.5.6	Uncertainty	135
10.6	Nozzle flow discharge calibration in view of prototype index test	135
Annex A (informative)	Dimensionless terms	136
Annex B (normative)	Physical properties, data	138
Annex C (informative)	Summarized test and calculation procedure	146
C.1	General	146
C.2	Agreements to be reached prior to testing	146
C.3	Model, test facility and instrumentation	147
C.3.1	Model manufacture and dimensional checks	147
C.3.2	Test facility instrumentation and data acquisition system	147
C.4	Tests and calculation of the model values	147
C.4.1	Test types	147
C.4.2	Measurement of the main quantities during the test	147
C.4.3	Uncertainty of the measured quantities	148
C.4.4	Calculation of the quantities related to the main hydraulic performance	148
C.4.5	Calculation of the dimensionless factors or coefficients and of the Thoma number	148
C.5	Calculation of prototype quantities	148
C.6	Plotting of model or prototype results	149
C.7	Comparison with the guarantees	149

C.8	Final protocol.....	149
C.9	Final test report	149
Annex D (normative) Computation of the prototype runaway characteristics taking into account friction and windage losses of the unit		150
Annex E (informative) Example of determination of the best smooth curve: method of separate segments		151
E.1	General.....	151
E.2	Principle of the method	151
E.3	Choice of the minimum width of the intervals	153
E.4	Determination of the intervals	153
Annex F (informative) Examples of analysis of sources of error and uncertainty evaluation		154
F.1	General.....	154
F.2	Example of analysis of sources of error and of uncertainty evaluation in the measurement of a physical quantity	154
F.2.1	General	154
F.2.2	Errors arising during calibration	155
F.2.3	Errors arising during the tests	156
F.3	Example of calculation of uncertainty due to systematic errors in the determination of the specific hydraulic energy, mechanical runner power and hydraulic efficiency	157
F.3.1	General	157
F.3.2	Discharge	157
F.3.3	Pressure.....	157
F.3.4	Specific hydraulic energy.....	157
F.3.5	Power	158
F.3.6	Hydraulic efficiency	159
Annex G (normative) The scale effect on hydraulic efficiency for Pelton turbines		160
G.1	General.....	160
G.2	Similarity considerations	160
G.3	Transposition formula	162
Annex H (normative) Analysis of random errors for a test at constant operating conditions		163
H.1	General.....	163
H.2	Standard deviation	163
H.3	Confidence levels	164
H.4	Student's t distribution	164
H.5	Maximum permissible value of uncertainty due to random errors.....	165
H.6	Example of calculation	166
Annex I (informative) Flux diagram of specific hydraulic energy and power		167
Bibliography.....		169
Figure 1 – Schematic representation of a Pelton machine		16
Figure 2 – Reference diameter and bucket width		17
Figure 3 – Reference level of a Pelton machine		19
Figure 4 – Flux diagram for power		21
Figure 5 – Illustration of some definitions related to oscillating quantities.....		24
Figure 6 – Acceleration due to gravity g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		27

Figure 7 – Density of distilled water ρ_{wd} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	30
Figure 8 – Example for homology limits for wetted parts of a vertical Pelton turbine.....	34
Figure 9 – Example for homology limit for wetted parts of a horizontal Pelton turbine	34
Figure 10 – Procedure for dimensional checks, comparison of results "steel to steel" and application of tolerances for model and prototype	37
Figure 11 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the distributor and the housing of vertical and horizontal shaft machines	39
Figure 12 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the buckets and nozzles	40
Figure 13 – Definition of waviness and surface roughness	45
Figure 14 – Time multiplexing data acquisition system.....	57
Figure 15 – Bus operated data acquisition system	57
Figure 16 – Time delay	59
Figure 17 – Typical low-pass filter attenuation characteristics	59
Figure 18 – Different measurement chains and their recommended checkpoints	62
Figure 19 – Typical data acquisition system.....	64
Figure 20 – Frequency response of analogue anti-aliasing filter.....	65
Figure 21 – Example of calibration curve	70
Figure 22 – Examples of pressure taps	82
Figure 23 – Types of pressure manifolds	83
Figure 24 – Dead weight manometer with compensation by pressure or force transducer (example of experimental set-up)	88
Figure 25 – Pressure weighbeam (example of experimental set-up).....	89
Figure 26 – Stilling well.....	92
Figure 27 – Point and hook gauges.....	93
Figure 28 – Balance arrangement	96
Figure 29 – Balance arrangement with two separate frames	97
Figure 30 – Arrangement with machine bearings and seals not in balance	97
Figure 31 – Arrangement using a torquemeter	98
Figure 32 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals in balance.....	98
Figure 33 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals not in balance.....	99
Figure 34 – Example showing main elevations, heights and reference levels of the test rig and model machine.....	105
Figure 35 – Pelton turbines with horizontal axis: determination of specific hydraulic energy of the machine	108
Figure 36 – Pelton model turbine: performance hill diagram (example for a six-nozzle machine).....	114
Figure 37 – Three-dimensional surface of hydraulic efficiency and curves of performance at E_{ND} constant.....	116
Figure 38 – Runaway curves for a six-nozzle Pelton turbine	118
Figure 39 – Runaway speed determined by extrapolation	118
Figure 40 – Measured hydraulic efficiency compared to guarantee point.....	123
Figure 41 – Comparison between guarantees and measurements.....	124

Figure 42 – Pelton turbine runaway speed and discharge curves: comparison between guarantees and measurements	125
Figure 43 – Pelton needle force factor as a function of relative needle stroke	130
Figure 44 – Example of pressure tap location for index test	134
Figure 45 – Example of graphical representation of index test data.....	134
Figure D.1 – Determination of the maximum runaway speed of the prototype taking into account the friction and windage losses of the unit	150
Figure E.1 – Principle of the method of separate segments.....	152
Figure E.2 – Example of determination of intervals	152
Figure G.1 – Influence of Froude number.....	161
Figure G.2 – Influence of Weber number.....	162
Figure G.3 – Influence of Reynolds number	162
Figure I.1 – Turbine	167
Table 1 – Coefficients of the Herbst and Roeger formula	29
Table 2 – Permissible maximum deviations.....	43
Table 3 – Maximum recommended prototype surface roughness R_a	46
Table 4 – Summary of errors that determine total measurement uncertainty	71
Table 5 – Examples of experimental setup of liquid column manometers	85
Table 6 – Nomenclature for Figure 28 to Figure 33	96
Table 7 – Similitude numbers.....	110
Table 8 – Similitude requirements for various types of model tests	111
Table 9 – Minimum values for model size and test parameters.....	113
Table 10 – Variables defining the operating point of a machine.....	114
Table A.1 – Dimensionless terms.....	137
Table B.1 – Acceleration due to gravity g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	138
Table B.2 – Density of distilled water ρ_{wd} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	139
Table B.3 – Kinematic viscosity of distilled water ν ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).....	141
Table B.4 – Vapour pressure of distilled water p_{va} (Pa)	142
Table B.5 – Density of dry air ρ_{a} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).....	143
Table B.6 – Ambient pressure p_{amb} (Pa).....	144
Table B.7 – Density of mercury ρ_{Hg} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).....	145
Table G.1 – Numerical data for surface tension σ^*	161
Table H.1 – Confidence levels	164
Table H.2 – Values of Student's t	165
Table H.3 – Computation of the estimated standard deviation and the uncertainty for eight observations	166

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**PELTON HYDRAULIC TURBINES –
MODEL ACCEPTANCE TESTS****FOREWORD**

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 63461 has been prepared by IEC technical committee 4: Hydraulic turbines. It is an International Standard.

This first edition of IEC 63461 cancels and replaces the third edition of IEC 60193 published in 2019. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) the Pelton-specific requirements are being removed;
- b) the new standard is published as a stand-alone publication.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
4/460/CDV	4/483/RVC

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

PELTON HYDRAULIC TURBINES – MODEL ACCEPTANCE TESTS

1 Scope

This document applies to laboratory model tests of any type of Pelton hydraulic turbine.

This document applies to models of prototype machines with unit power greater than 5 MW. Full application of the procedures herein described is not generally justified for machines with smaller power. Nevertheless, this document can be used for such machines by agreement between the purchaser and the supplier.

This document excludes all matters of purely commercial interest, except those inextricably bound up with the conduct of the tests.

This document is concerned with neither the structural details of the machines nor the mechanical properties of their components, so long as these do not affect model performance or the relationship between model and prototype performances.

This document covers the arrangements for model acceptance tests to be performed on Pelton turbines to determine if the main hydraulic performance contract guarantees (see 9.2) have been satisfied.

It contains the rules governing test conduct and provides measures to be taken if any phase of the tests is disputed.

The main objectives of this document are:

- to define the terms and quantities used;
- to specify methods of testing and of measuring the quantities involved, in order to ascertain the hydraulic performance of the model;
- to specify the methods of computation of results and of comparison with guarantees;
- to determine if the contract guarantees that fall within the scope of this document have been fulfilled;
- to define the extent, content and structure of the final report.

The guarantees can be given in one of the following ways:

- guarantees for prototype hydraulic performance, computed from model test results considering scale effects;
- guarantees for model hydraulic performance.

Moreover, additional performance data (see Clause 10) can be needed for the design or the operation of the prototype of the hydraulic machine. Contrary to the requirements of Clause 8 related to main hydraulic performance, the information of these additional data given in Clause 10 is considered only as recommendation or guidance to the user (see 10.1).

Model acceptance tests are performed if the expected field conditions for acceptance tests (see IEC 60041:1991) would not allow the verification of guarantees given for the prototype machine.

It is important that the method for performance conversion from model to prototype be clearly defined in the main hydraulic performance contract.

This document can also be applied to model tests for other purposes, i.e. comparative tests and research and development work.

If model acceptance tests have been performed, field tests can be limited to index tests (see IEC 60041:1991).

If a contradiction is found between this document and any other document, this document prevails.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 2186:2007, *Fluid flow in closed conduits – Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements*

ISO 2533:1975, *Standard atmosphere*

ISO 4185:1980, *Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method*

ISO 8316:1987, *Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank*

3 Terms, definitions, symbols and units

3.1 General

For the purposes of this document, the following terms, definitions, symbols and units apply. Specialized terms are explained where they appear.

Clarification of any term, definition or unit of measure in question shall be agreed to in writing by the contracting parties in advance of the test.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

3.2 Terms and definitions

3.2.1 point

value established by one or more consecutive sets of readings or recordings at unchanged operating condition and settings, sufficient to calculate the performance of the machine at this operating condition and these settings

3.2.2 test

collection of points and results adequate to establish the performance of the machine over a specified range of operating conditions

3.2.3**hydraulic performance**

all performance parameters attributable to the machine owing to hydrodynamic effects

3.2.4**additional data**

subset of hydraulic performance data which can be determined for information on the model (see Clause 10)¹

3.2.5**guarantee**

specified performance data contractually agreed to

3.2.6**measurand**

quantity subjected to measurement

3.2.7**transducer**

measuring device, which provides an output quantity with a given relationship to the input quantity

3.2.8**transducer with digitized output**

measuring device with built-in electronics to give a digitized output

Example Serial port RS 232.

3.2.9**multiplexer****MUX**

device for switching two or more signals in order to share the same analogue-to-digital converter, frequency counter or cabling facilities

3.2.10**analogue-to-digital converter****A/D converter**

device that translates continuous analogue signals into discrete digital signals

3.2.11**counter**

device that measures frequency, time period or number of pulses

3.2.12**voltage-to-frequency converter****V/F converter**

device that translates with a given relationship voltage levels into frequency

3.2.13**aliasing**

when sampling analogue signals with a sampling rate less than twice that of the frequency of the highest frequency signal or noise component ("Nyquist rate"), the sampling process will produce spurious low frequency signals (aliases) that cannot be distinguished from the original signal

¹ However, the prediction of the corresponding prototype data is less accurate than that achievable for the main hydraulic performance data, owing to application of approximate similarity rules.

3.2.14

computer interface

communication port that enables the computer to control and communicate with other compatible devices

3.3 Units

The International System of Units (SI, see ISO 80000-4) has been used throughout this document.

All terms are given in SI base units or derived coherent units². The basic equations are valid using these units. This shall be taken into account if other than coherent SI units are used for certain data (e.g. kilowatt instead of watt for power, kilopascal or bar instead of pascal for pressure, min^{-1} instead of s^{-1} for rotational speed, etc.). Temperatures may be given in degrees Celsius since absolute temperatures (in kelvins) are rarely required.

Any other system of units may be used, but only if agreed in writing by the contracting parties.

In the International System of Units, mass (kg) is one of the base quantities. The energy per unit mass, known as "specific energy", is used in this document as a primary term instead of the energy per local unit weight which is called "head", and was exclusively used in previous publications.

The latter term ("head") has the disadvantage that weight is a force which depends on the local value of acceleration due to gravity g , which changes mainly with latitude but also with altitude. Nevertheless, the term "head" will still remain in use because it is very common. Therefore, both related energy terms are listed, the specific energy terms in 3.4.7 and head terms in 3.4.8. They differ only by the factor g , which is the local value of acceleration due to gravity.

3.4 Terms, definitions, symbols and units

3.4.1 List by topics

Subclause	Title
3.4.2	Subscripts and symbols
3.4.3	Geometric terms
3.4.4	Physical quantities and properties
3.4.5	Discharge, velocity and speed terms
3.4.6	Pressure terms
3.4.7	Specific energy terms
3.4.8	Height and head terms
3.4.9	Power and torque terms
3.4.10	Efficiency terms
3.4.11	General terms relating to fluctuating quantities
3.4.12	Fluid dynamic and scaling terms
3.4.13	Dimensionless terms
3.4.14	Terms related to additional performance data

² $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{W} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

3.4.2 Subscripts and symbols

Subclause	Term	Definition	Subscript or symbol
3.4.2.1	High-pressure reference section	The high-pressure section of the machine to which the performance guarantees refer (see Figure 1)	1
3.4.2.2	Low-pressure ^{a)} reference section	The low-pressure section of the machine to which the performance guarantees refer	2
3.4.2.3	High-pressure measuring sections	High-pressure sections of the machine used for measurement Note 1 to entry: Whenever possible, these sections should coincide with section 1; otherwise the measured values shall be adjusted to section 1 (see 8.2.2.1.3)	1', 1''.
3.4.2.4	Low-pressure measuring sections	Low-pressure sections of the machine used for measurement Note 1 to entry: Whenever possible, these sections should coincide with section 2; otherwise, the measured values shall be adjusted to section 2 (see 8.2.2.1.3)	2', 2''.
3.4.2.5	Specified	Subscript denoting values of quantities such as rotational speed, discharge etc. for which other quantities are guaranteed	sp
3.4.2.6	Maximum/minimum	Subscript denoting maximum or minimum values of any term	max min
3.4.2.7	Limits	Contractually defined values: – not to be exceeded – to be reached	$\frac{///}{\square}$ — or $///$
3.4.2.8	Prototype	Subscript denoting values related to the full-size machine	P
3.4.2.9	Model	Subscript denoting values related to the model	M
3.4.2.10	Reference	Subscript denoting values related to a specified reference condition	ref
3.4.2.11	Optimum	Subscript denoting the best efficiency point	opt
3.4.2.12	Ambient	Subscript referring to surrounding atmospheric conditions	amb
3.4.2.13	Plant	Subscript denoting values related to the operating conditions of the prototype in the plant	pl
3.4.2.14	Runaway	Subscript referring to runaway conditions	R
3.4.2.15	Runner bucket	Subscript referring to the runner bucket of a machine.	B
3.4.2.16	Pelton deflector	Subscript referring to the Pelton deflector of a machine.	D
3.4.2.17	Pelton needle	Subscript referring to the Pelton needle of a machine	N
3.4.2.18	Cartesian coordinates	Subscript referring to machine coordinates	x, y, z
3.4.2.19	Theoretical value	Subscript referring to theoretical value	th
3.4.2.20	Hydraulic	Subscript referring to hydraulic value	h

^{a)} The low-pressure section is necessary in the case of Pelton turbine operated with pressurized casing.

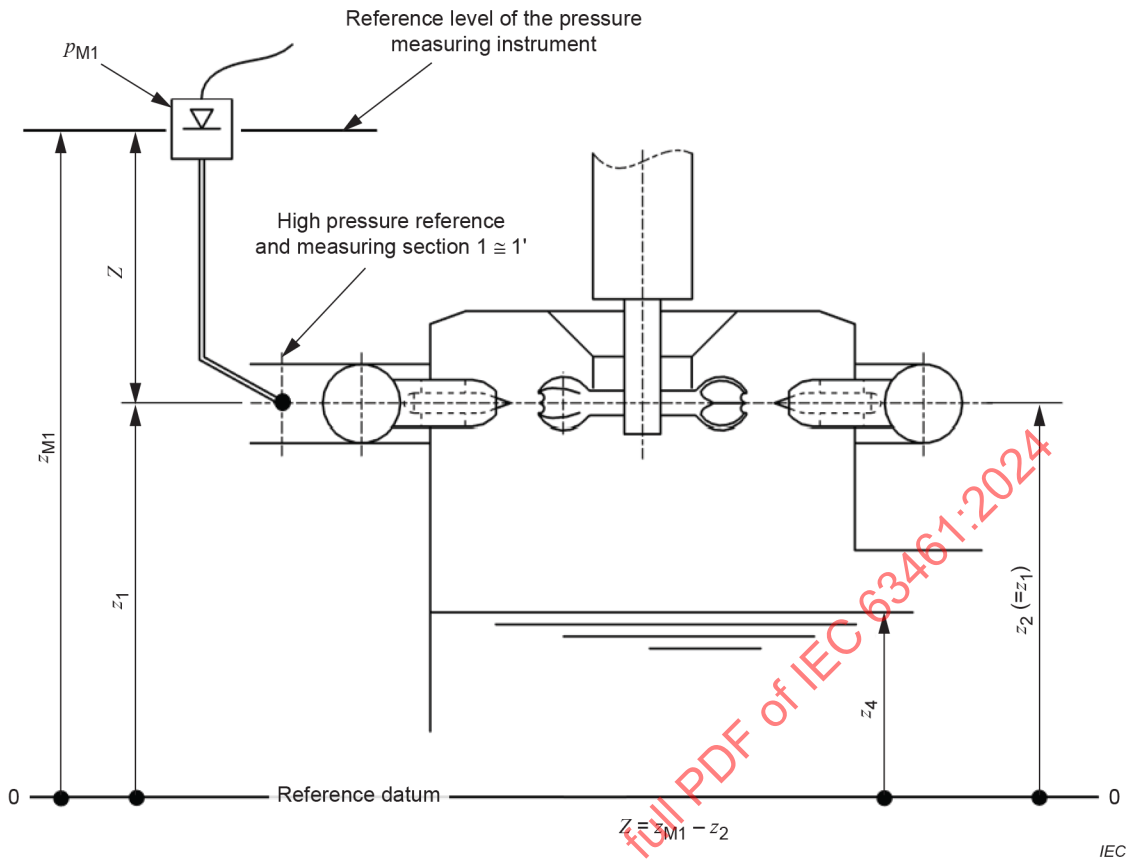


Figure 1 – Schematic representation of a Pelton machine

3.4.3 Geometry

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.3.1	Area	Net cross-sectional surface normal to general flow direction	A	m ²
3.4.3.2	Needle stroke	Average needle stroke measured from closed position	s	m
3.4.3.3	Reference diameter	Mean diameter of the circles tangent to the jets axis centred on the runner axis in the mid plane of the runner (see Figure 2)	D	m
3.4.3.4	Bucket width	Inside maximum width of runner bucket of a Pelton turbine (see Figure 2 and Figure 12)	B	m
3.4.3.5	Length scale ratio	The ratio of representative prototype to model lengths; in normal cases this is the reference diameter of the machine Note 1 to entry: In cases where it is difficult to verify this reference, then another significant length may be taken	λ_L	-
3.4.3.6	Level	Elevation of a point in the system above the specified reference datum (usually mean sea level)	z	m
3.4.3.7	Length	Relevant linear size of a component of the machine	L	m
3.4.3.8	Arithmetic roughness	Arithmetic mean deviation of the assessment profile	Ra	µm
3.4.3.9	Number of nozzles	Number of nozzles of the Pelton turbine	z_0	
3.4.3.10	Number of jets in operation	Number of jets of the Pelton turbine in operation	z_j	

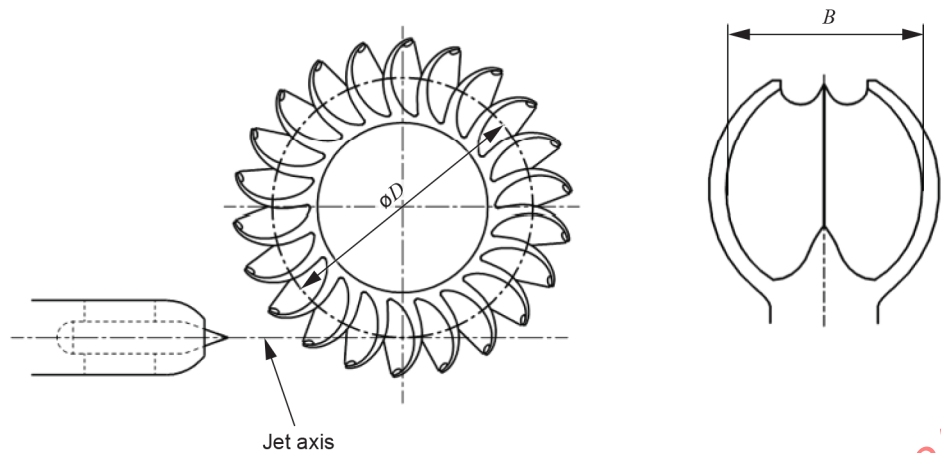


Figure 2 – Reference diameter and bucket width

3.4.4 Physical quantities and properties

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.4.1	Acceleration due to gravity	Local value of gravitational acceleration at the place of testing (see 4.2); theoretical values as a function of altitude and latitude are given in Table B.1	g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
3.4.4.2	Temperature	Thermodynamic (kelvin) Degree Celsius $\theta = \Theta - 273,15$	Θ θ	K °C
3.4.4.3	Volume	Quantity of three-dimensional space an object/substance occupies	V	m^3
3.4.4.4	Density	Mass per unit volume a) Density of water ρ is commonly used instead of ρ_{wa} b) Density of distilled water Values for distilled water ρ_{wd} are given in 4.3.1.3 and in Table B.2 c) Density of air Values for air are given in 4.4.1 and in Table B.5 d) Density of mercury Values for mercury are given in 4.5 and in Table B.7	ρ, ρ_{wa} ρ_{wd} ρ_{a} ρ_{Hg}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
3.4.4.5	Vapour pressure (absolute)	Absolute partial pressure of saturated vapour in a medium where liquid and gaseous phases of a body are in thermodynamic balance Note 1 to entry: The vapour pressure depends only on the temperature. Values for distilled water are given in 4.3.3 and in Table B.4	p_{va}	Pa
3.4.4.6	Dynamic viscosity	A quantity characterizing the mechanical behaviour of a fluid (see ISO 80000-4)	μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
3.4.4.7	Kinematic viscosity	Ratio of the dynamic viscosity to the density of a fluid Note 1 to entry: Values for distilled water as a function of temperature are given in 4.3.2 and in Table B.3	ν	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
3.4.4.8	Surface tension	A quantity characterizing the mechanical behaviour of the interface between two fluids (see ISO 80000-4)	σ^*	$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$

3.4.5 Discharge, velocity and speed

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.5.1	Discharge	Volume of water per unit time passing through any section in the system	Q	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.2	Mass flow rate	Mass of water flowing through any section of the system per unit time Note 1 to entry: Both ρ and Q shall be determined at the same section and at the conditions existing in that section Note 2 to entry: The mass flow rate is constant between two sections if no water is added or removed.	(ρQ)	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.3	Measured discharge	Volume of water per unit time flowing through any measuring section, e.g. 1' or 2' (see 3.4.2.3 and 3.4.2.4)	Q_1 , or Q_2	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.4	Discharge at reference section	Volume of water per unit time flowing through the reference section 1 or 2	Q_1 or Q_2	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.5	Corrected discharge at reference section	Volume of water per unit time flowing through the reference section referred to the ambient condition (see 3.4.6.2), e.g. $Q_{1c} = (\rho Q)_1 / \rho_{\text{amb}}$ Note 1 to entry: Given the normal conditions of a model test, Q_{1c} may be assumed equal to Q_1 .	Q_{1c} or Q_{2c}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.6	Discharge at steady-state runaway speed	Discharge at n_R (see 3.4.5.12)	Q_R	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.7	No-load turbine discharge	Turbine discharge at zero mechanical power at specified speed (usually synchronous) and specified specific hydraulic energy	Q_o	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.8	Mean velocity	Discharge Q divided by area A of the cross-section	v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.9	Peripheral velocity	Speed at the reference diameter: $u = \pi D n$	u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.10	Rotational speed	Number of revolutions per unit time	n	s^{-1}
3.4.5.11	Steady-state runaway speed	The steady-state rotational speed at zero mechanical power at specified hydraulic conditions and specified needle opening	n_R	s^{-1}
3.4.5.12	Maximum steady-state runaway speed	The highest value of steady-state runaway speed at specified hydraulic conditions (for the prototype, see detailed definition in IEC 60041:1991, 2.3.4.15)	$n_{R\text{max}}$	s^{-1}

3.4.6 Pressure

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.6.1	Absolute pressure	static pressure of a fluid measured with reference to a perfect vacuum	p_{abs}	Pa
3.4.6.2	Ambient pressure	absolute pressure of the ambient air (see 4.4.2) Note 1 to entry: Values for standard atmosphere are given as a function of elevation in Table B.6.	p_{amb}	Pa
3.4.6.3	Gauge pressure	difference between the absolute static pressure of a fluid at the reference level of the pressure measuring instrument and the ambient pressure at the place and time of measurement: $p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	p	Pa
3.4.6.4	Differential pressure	difference in pressure between two points or sections of measurement	Δp	Pa

3.4.7 Specific energy

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.7.1	Specific hydraulic energy of machine	The energy per unit mass of water available between the high and low-pressure reference sections 1 and 2 of the machine, taking into account the influence of compressibility (see 8.2) $E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$ with $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ and assuming $g = g_1 = g_2$ Note 1 to entry: The value of ρ_1 and ρ_2 can be calculated from p_{abs1} and p_{abs2} respectively, taking into account θ_1 or θ_2 for both values, given the negligible influence of the difference of the temperature on ρ.	E	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.4.8 Height and head

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.8.1	Turbine head	Specific energy per local unit weight of water at any section $H = \frac{E}{g}$	H	m
3.4.8.2	Reference level of the machine	Elevation of a point of the machine taken as reference for the setting of the machine (see Figure 3)	z_r	m
3.4.8.3	Reference level of the pressure measuring instrument	Elevation of a pressure measuring device (see Figure 34)	z_M	m

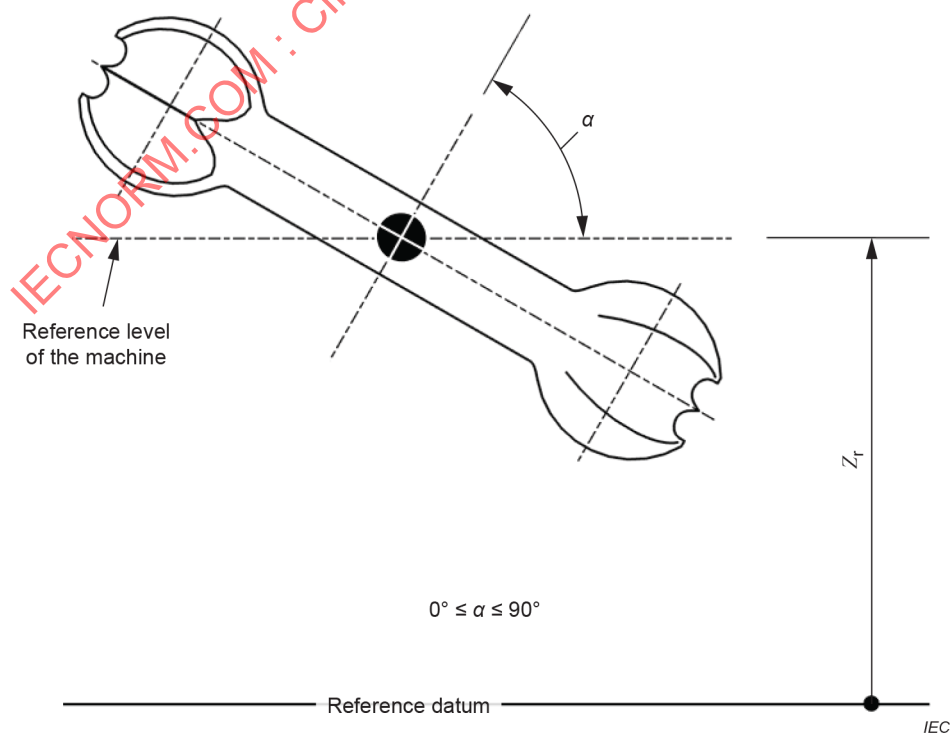
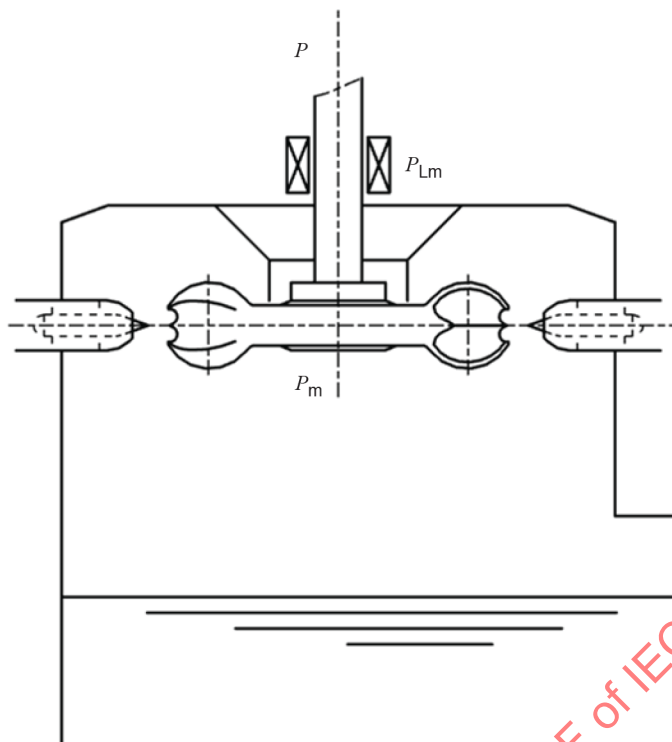


Figure 3 – Reference level of a Pelton machine

3.4.9 Power and torque

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.9.1	Hydraulic power	Hydraulic power available for producing power (turbine) or imparted to the water (pump) $P_h = E(\rho Q)_1$	P_h	W
3.4.9.2	Mechanical power of the machine (power)	Mechanical power delivered by the turbine shaft or to the pump shaft, assigning to the hydraulic machine the mechanical losses of the relevant bearings and shaft seals (see Figure 4)	P	W
3.4.9.3	Mechanical power of runner(s)	Mechanical power transmitted through the coupling of the runner(s) and the shaft (see Figure 4)	P_m	W
3.4.9.4	Mechanical power losses	Mechanical power dissipated in guide bearings, thrust bearings and shaft seals of the hydraulic machine (see Figure 4)	P_{Lm}	W
3.4.9.5	Shaft torque	Torque applied to the shaft of the hydraulic machine and corresponding to the mechanical power of the machine (see 3.4.9.2)	T	N·m
3.4.9.6	Runner torque	Torque transmitted through the coupling of the runner and the shaft and corresponding to the mechanical power of runner (see 3.4.9.3)	T_m	N·m
3.4.9.7	Friction torque	Friction torque in guide bearings, thrust bearings and shaft seals of the hydraulic machine (see 3.4.9.4)	T_{Lm}	N·m

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024



Hydraulic power

$$P_h = E \rho Q$$

Mechanical power of the machine

$$P = P_m - P_{Lm}$$

Mechanical efficiency

$$\eta_m = \frac{P}{P_m}$$

Hydraulic efficiency

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$$

Efficiency

$$\eta = \frac{P}{P_h}$$

NOTES

- The formulae ignore the compressibility of the water.
- For detailed analysis of internal losses, refer to Annex I.

Figure 4 – Flux diagram for power

3.4.10 Efficiency

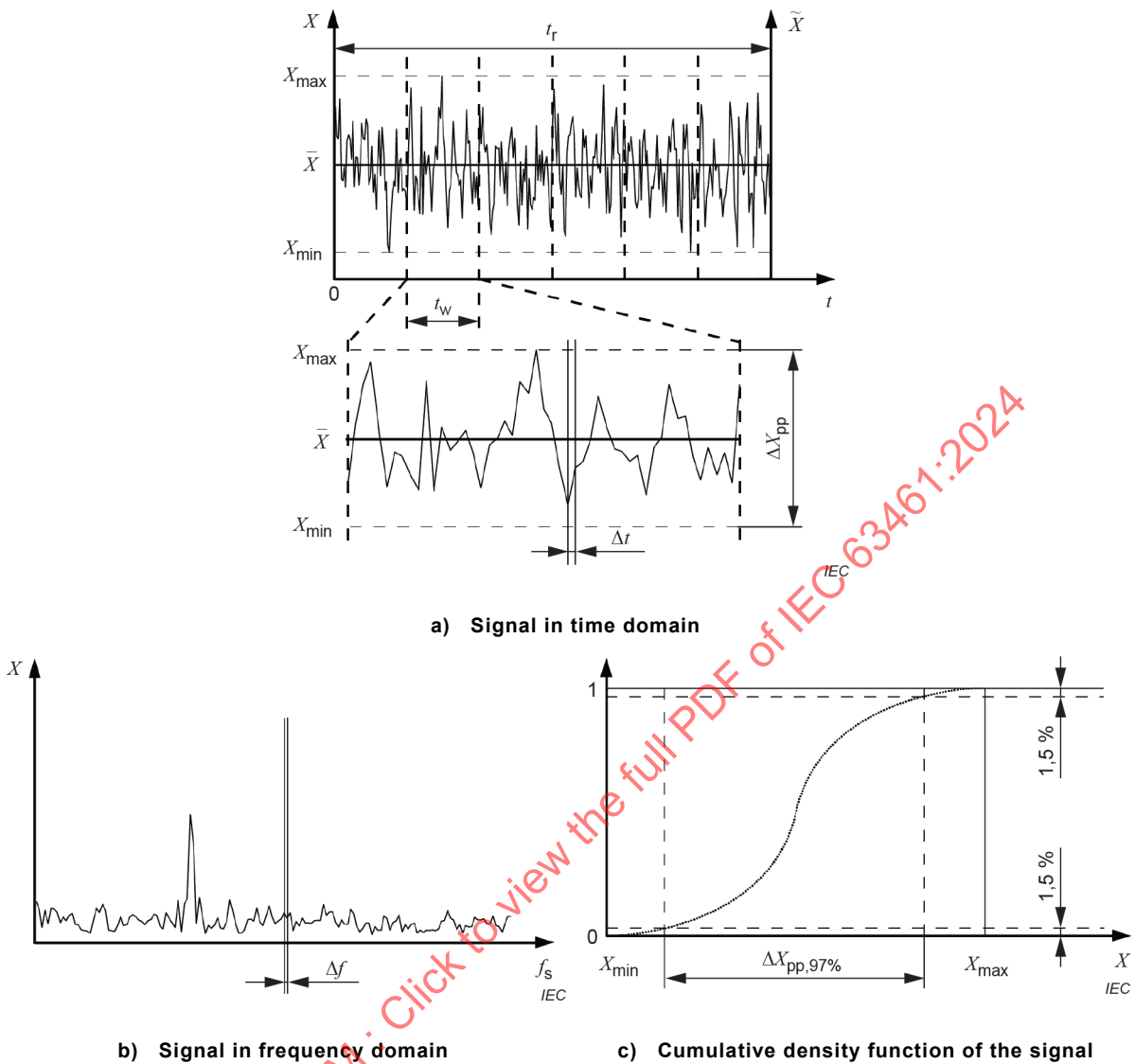
Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.10.1	Hydraulic efficiency	Ratio of mechanical power of runner to the hydraulic power $\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$ See Figure 4	η_h	-
3.4.10.2	Mechanical efficiency	Ratio of mechanical power of the machine to the runner $\eta_m = \frac{P}{P_m}$ See Figure 4	η_m	-
3.4.10.3	Efficiency	Ratio of mechanical power of the machine to the hydraulic power $\eta = \frac{P}{P_h} = \eta_h \times \eta_m$ See Figure 4	η	-
3.4.10.4	Weighted average efficiency	Calculated from the formula $\eta_w = \frac{w_1\eta_1 + w_2\eta_2 + w_3\eta_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots}$ where $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ are the values of efficiency at specified operating conditions and $w_1, w_2, w_3 \dots$ are their agreed weighting factors respectively	η_w	-

3.4.11 Fluctuating quantities

NOTE IEC 60994 provides a reference for terms relating to fluctuating quantities. Terms relevant to this document, some of which are illustrated in Figure 5, are listed below.

Subclause	Term	Definition	Symbol	IEC 60994:1991
3.4.11.1	Discrete quantity	Quantity represented by a sequence of its momentary values	X	
3.4.11.2	Discrete quantity n	Value of the quantity n	X_n	
3.4.11.3	Number of samples	Total number of discrete quantities	N	
3.4.11.4	Number of samples in a time window	Total number of discrete quantities used in the time window duration	N_w	
3.4.11.5	Mean value	Algebraic sum of the discrete quantities divided by the number of samples $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n$	$\bar{X}$	2.3.3.1
3.4.11.6	Fluctuation of quantity	Oscillatory variation of a quantity X referred to its mean value during a time interval Δt previously selected	$\tilde{X}(t)$	2.3.1.5
3.4.11.7	Maximum value	Maximum value in a chosen time interval	$X_{\max}$	
3.4.11.8	Minimum value	Minimum value in a chosen time interval	$X_{\min}$	
3.4.11.9	Standard deviation Effective value referred to the mean	Root-mean-square value of the deviation of a set of numbers from the mean value $\tilde{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}$	$\tilde{X}_{\text{eff}}$	2.3.3.2

Subclause	Term	Definition	Symbol	IEC 60994:1991
3.4.11.10	Root-mean-square value	Square root of the mean value squared $X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^2}$	X_{rms}	2.3.3.3
3.4.11.11	Peak-to-peak value	Difference between the maximum and minimum values $\Delta X_{\text{pp}} = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$	ΔX_{pp}	2.3.2.11
3.4.11.12	Peak-to-peak value with a 97 % confidence interval	Difference between the maximum and minimum values of a signal is determined using a probability distribution function for a given probability value (e.g. 97 %) Note 1 to entry: This function is estimated by applying statistical counting. The signal values outside of the corresponding confidence interval are excluded.	$\Delta X_{\text{pp},97\%}$	
3.4.11.13	Amplitude	Maximum value of a sinusoidal quantity $X(t)$ $A = \frac{1}{2} D X_{\text{pp}}$	A	2.3.2.10
3.4.11.14	Time	Physical quantity	t	2.3.2.3
3.4.11.15	Sampling time interval	Time interval between two consecutive samples.	Δt	
3.4.11.16	Frequency	The reciprocal of period s^{-1} (Hz)	f	2.3.2.4
3.4.11.17	Sampling frequency Sampling rate	Inverse of the sampling time interval $f_s = \frac{1}{\Delta t}$	f_s	
3.4.11.18	Time window duration	Selected time window for frequency analyses by Fourier transform methods $t_w = N_w \Delta t$	t_w	
3.4.11.19	Frequency resolution	Frequency interval between two consecutive values in the discrete Fourier transform $\Delta f = 1/t_w = f_s/N$	Δf	
3.4.11.20	Signal recording time Acquisition time	Period of time during which a signal from a transducer is recorded (in seconds).	t_r	2.3.4.14



- A fluctuating signal over a defined signal recording time (t_r). A minimum of 5 window time lengths (t_w) shall be included in each signal record time duration (see 6.2.2.4).
- The signal transformed into the frequency domain using Fourier analysis. The frequency resolution (Δf) required for each analysis is determined by the speed of rotation of the machine (see 6.2.2.4).
- Using probability distribution, each measure point from Figure 5 a) is cumulated and extreme deviations from the mean fluctuation are removed. A 97 % interval of confidence is illustrated in this figure.

Figure 5 – Illustration of some definitions related to oscillating quantities

3.4.12 Fluid dynamics and scaling^{a)}

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.12.1	Reynolds number	Ratio of inertia forces to viscous forces (see 8.4.1) in Pelton turbines $\frac{uB}{\nu}$	Re	-
3.4.12.2	Froude number ^{b)}	Square root of the ratio of inertia forces to gravity forces (see 8.4.1) in Pelton turbines $\left[\frac{E}{gB}\right]^{1/2}$	Fr	-
3.4.12.3	Weber number ^{b)}	Ratio of inertia forces to surface tension forces $We = \left[\frac{\rho B v^2}{\sigma^*}\right]^{1/2}$ (see 8.4.1)	We	-
3.4.12.4	Difference of hydraulic efficiency	Difference between the values of hydraulic efficiency at two hydraulically similar operating points measured at different test conditions (see 8.4.2) $\Delta\eta_h$		-
^{a)} See ISO 80000-11. ^{b)} Other definitions of these numbers can be found in relevant scientific works.				

3.4.13 Dimensionless terms and definitions

NOTE 1 Machine performance can be characterized by dimensionless terms based on $E = 1$, $D = 1$ and $\rho = 1$ or on $n = 1$, $D = 1$ and $\rho = 1$.

NOTE 2 The units are: H (m); D (m); E ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); n (s^{-1}); ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); T ($\text{N} \cdot \text{m}$); P (W); Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

NOTE 3 The relations of these dimensionless terms to other existing definitions are given in Annex A.

Subclause	Term	Definition	Symbol	Relations
3.4.13.1	Speed factor	$\frac{nD}{E^{0.5}}$	n_{ED}	
3.4.13.2	Discharge factor	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0.5}}$	Q_{EB}	
3.4.13.3	Discharge factor per nozzle	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0.5} z_j}$	$Q_{EB,zj}$	$= \frac{Q_{EB}}{z_j}$
3.4.13.4	Torque factor	$\frac{T_m}{\rho_1 D^3 E}$	T_{ED}	$= \frac{T_{nD}}{E_{nD}} = \frac{P_{ED}}{2\pi n_{ED}}$
3.4.13.5	Power factor ^{a)}	$\frac{P_m}{\rho_1 D^2 E^{1.5}}$	P_{ED}	$= Q_{EB} \eta_{hT}$ $= 2\pi n_{ED} T_{ED}$
3.4.13.6	Specific flow rate	$\frac{Q_1}{\pi (B/2)^2 (2E)^{0.5} z_j}$	f_B	
3.4.13.7	Energy coefficient	$\frac{E}{n^2 D^2}$	E_{nD}	
^{a)} Reference is made to the mechanical power of the runner, usually measured on the model.				

3.4.14 Additional performance data

NOTE For presentation and analysis of additional performance data such as pressure and torque fluctuations, hydraulic thrust, and hydraulic loads on control components, dimensionless terms are used as defined hereafter and in 10.1 to 10.2. They are identified by the symbol of the measured quantity with subscripts denoting the machine component and the quantities taken as unity; for instance, $T_{D,EB}$ will denote the deflector torque factor, i.e. the torque acting on the deflector based on specific hydraulic energy of the machine and bucket width equal to unity.

The symbols used to define the measurements are listed below:

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.14.1	Force	Influence tending to produce motion or stress on a machine component	F	N
3.4.14.2	Moment	Magnitude of a turning effect produced by a force acting at a perpendicular distance to a given point	M	N·m
3.4.14.3	Pressure	Force per unit area	p	Pa
3.4.14.4	Torque	Axial component of the moment	T	N·m

The dimensionless terms relating to additional performance data are listed below:

Subclause	Term	Definition	Symbol	Unit
3.4.14.5	Deflector torque factor	$T_{D,EB} = \frac{T_D}{\rho D B^2 E}$	$T_{D,EB}$	-
3.4.14.6	Deflector torque coefficient	$T_{D,nB} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^3 B^2}$	$T_{D,nB}$	-
3.4.14.7	Needle force factor	$F_{N,EB} = \frac{F_N}{\rho B^2 E}$	$F_{N,EB}$	-
3.4.14.8	Needle force coefficient	$F_{N,nB} = \frac{F_N}{\rho n^2 D^2 B^2}$	$F_{N,nB}$	-

4 Physical properties

4.1 General

This subclause defines the main physical properties needed to characterize the hydraulic behaviour of hydraulic machines. The terms and definitions of most of these quantities are listed in 3.4.4 together with their symbols and units.

The formulae, which can be used in data processing to calculate these quantities, are listed in 4.2, 4.3 and 4.4. For convenience, tables of numerical values derived from these formulae are given in Annex B.

4.2 Acceleration due to gravity

Acceleration due to gravity g (see 3.4.4.1) is given as a function of latitude and altitude:

$$g = 9,780 \, 3 \left(1 + 0,005 \, 3 \sin^2 \varphi \right) - 3 \times 10^{-6} z \, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

where

- φ is the latitude in radians;
- z is the altitude in metres.

Values of g are given in Table B.1 and are represented in Figure 6.

The international standard value of acceleration due to gravity g_n is $9,806\,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

If measured values of g are available, they shall be used. The local value of g can be measured for example by a pendulum or free fall (in vacuum).

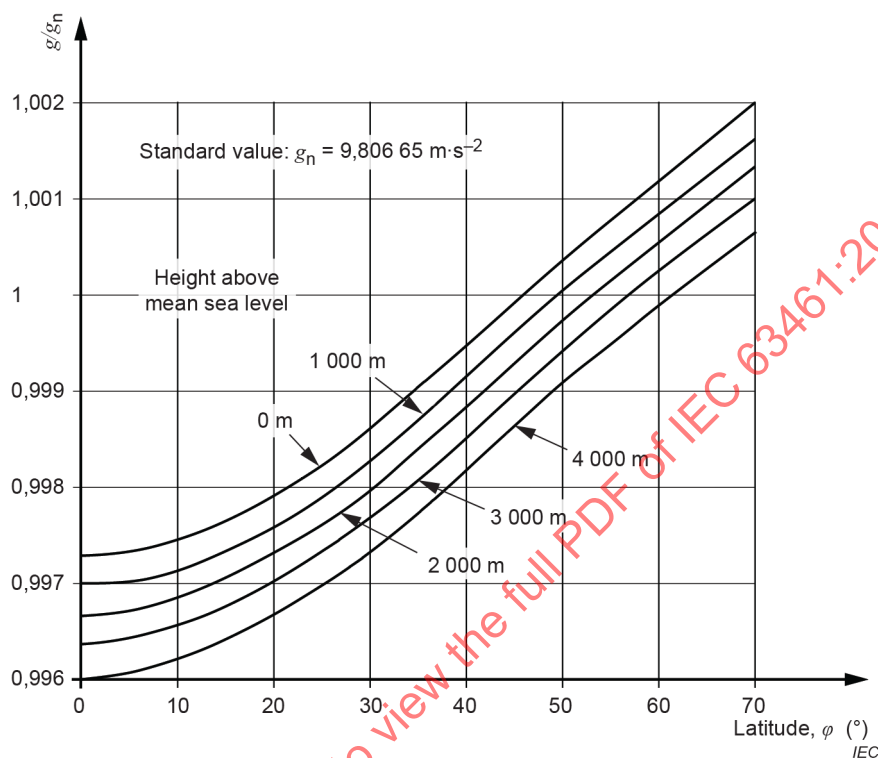


Figure 6 – Acceleration due to gravity g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

4.3 Physical properties of water

4.3.1 Density of water

4.3.1.1 Application of the density of water

In testing hydraulic machines, the density of water ρ (see 3.4.4.3) shall be known in order to:

- determine the specific hydraulic energy of machine E from pressure measurements (see 3.4.7.1);
- determine the mass flow rate (ρQ) needed for the calculation of the hydraulic power (see 3.4.9.1);

and, if necessary, to:

- calculate the pressure from measurements by using a water column manometer (see 7.2.4.2.1);
- determine the discharge when the weighing method is used for the measurement itself or for the calibration (see 7.1.4.1 and 7.1.4.2).

4.3.1.2 Density of actual water

The water used for model testing in the laboratory contains slight quantities of dissolved substances, depending on the local hydrological conditions. Therefore, its actual density ρ_{wa} is higher than that of distilled water ρ_{wd} (see 4.3.1.3). However, the value of ρ_{wa} in the model test equipment generally differs by less than 0,05 % from the value of distilled water ρ_{wd} .

For calculation of the hydraulic efficiency, this deviation is negligible if the determination of the specific hydraulic energy of the machine E is predominantly obtained by pressure measurement. Therefore, in most cases, it is sufficient and suitable to apply the values for distilled water.

However, if it is necessary to determine the density ρ_{wa} of the water actually used, several methods can be applied:

- an indirect method using a calibrated pressure gauge connected to a static free water level, as described in 7.2.5.2;
- direct methods such as a precision hydrometer (e.g. a pycnometer or so called "density bottle") or a buoyancy method.

It may be assumed that the ratio of the actual and distilled water densities is constant whatever the pressure and temperature. So, if the density of the actual water has been measured at certain conditions of pressure and temperature ($\rho_{wa,c}$), its value for any other condition can be calculated by:

$$\rho_{wa} = \left(\frac{\rho_{wa,c}}{\rho_{wd,c}} \right) \rho_{wd}$$

where ρ_{wd} and $\rho_{wd,c}$ are calculated in accordance with 4.3.1.3.

4.3.1.3 Density of distilled water

The formula for the density ρ_{wd} of distilled water as a function of temperature and pressure is derived by Herbst and Roegner [1]³ from the empirical state equation of the free enthalpy of distilled water. In determining the coefficients below, all the test results of Kell and Whalley [2] and of Kell, McLaurin and Whalley [3] were used.

$$\rho_{wd} = 10^2 \left[\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 R_{ij} \times \alpha^j \times \beta^{(i-1)} \right]^{-1}$$

where

$$\beta = \frac{1}{p^*} (p_{abs} + 200 \times 10^5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\theta^*} (\theta - \theta_1)$$

with

$$p^* = 10^5 \text{ Pa};$$

$$\theta^* = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

³ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

from 0 °C to 20 °C: $\theta_1 = 0$ °C;

from 20 °C to 50 °C: $\theta_1 = 20$ °C

The formula is valid in the used pressure range from $p_{\text{abs}} = 0$ Pa to 150×10^5 Pa

Table 1 furnishes the coefficients R_{ij} ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$).

Table 1 – Coefficients of the Herbst and Roegener formula

$R(i,j)$ in the temperature range 0,0 °C to 20,0 °C				
i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
0	$0,446\,674\,155\,7 \times 10^{-4}$	$-0,559\,450\,069\,7 \times 10^{-4}$	$0,340\,259\,195\,5 \times 10^{-5}$	$-0,413\,634\,518\,7 \times 10^{-7}$
1	$0,101\,069\,380\,2$	$-0,151\,370\,926\,3 \times 10^{-4}$	$0,106\,379\,874\,4 \times 10^{-5}$	$-0,814\,607\,899\,5 \times 10^{-8}$
2	$-0,539\,839\,211\,9 \times 10^{-5}$	$0,467\,275\,668\,5 \times 10^{-7}$	$-0,119\,476\,536\,1 \times 10^{-8}$	$0,136\,632\,205\,3 \times 10^{-10}$
3	$0,778\,011\,812\,1 \times 10^{-9}$	$-0,161\,939\,132\,2 \times 10^{-10}$	$0,588\,354\,748\,5 \times 10^{-12}$	$-0,875\,401\,428\,7 \times 10^{-14}$
$R(i,j)$ in the temperature range 20,0 °C to 50,0 °C				
i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
0	$-0,441\,035\,565\,0 \times 10^{-4}$	$0,305\,225\,289\,8 \times 10^{-4}$	$0,920\,784\,842\,7 \times 10^{-6}$	$-0,259\,043\,119\,8 \times 10^{-7}$
1	$0,101\,126\,989\,2$	$0,176\,395\,623\,4 \times 10^{-4}$	$0,575\,034\,004\,4 \times 10^{-6}$	$-0,192\,376\,997\,8 \times 10^{-8}$
2	$-0,483\,244\,116\,3 \times 10^{-5}$	$0,153\,328\,170\,4 \times 10^{-7}$	$-0,374\,972\,129\,4 \times 10^{-9}$	$0,132\,280\,418\,0 \times 10^{-11}$
3	$0,619\,443\,332\,7 \times 10^{-9}$	$-0,316\,454\,043\,1 \times 10^{-11}$	$0,631\,138\,912\,3 \times 10^{-13}$	$0,246\,924\,934\,2 \times 10^{-15}$

Instead of the formulae of Herbst and Roegener [1], the formulae of Borel and Lan [4] or of Haar, Gallagher and Kell [5] can also be used for calculation by computer.

All these authors have taken the experimental values of [2] and [3] as their basis. The values of these references are within the same range of accuracy ($\pm 0,01$ %) in the range of temperature and pressure as mentioned above.

For numerical application, the simpler empirical equation of Weber [6], somewhat transformed, may be used. The values calculated for temperatures up to 35 °C and pressures up to 150×10^5 Pa are within the same range of accuracy as mentioned above:

If V is the specific volume in $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$:

$$V = \frac{1}{\rho} = V_0 \left[(1 - Ap) + 8 \times 10^{-6} (\theta - B + Cp)^2 - 6 \times 10^{-8} (\theta - B + Cp)^3 \right]$$

with

$$V_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$p = p_{\text{abs}} \text{ (Pa)}$$

$$\theta = \text{temperature (°C)}$$

$$A = 4,669\,9 \times 10^{-10}$$

$$B = 4,0$$

$$C = 2,131\,891\,3 \times 10^{-7}$$

Values for distilled water on the basis of the formula of Herbst and Roegener [1] are given in Table B.2 and are represented in Figure 7.

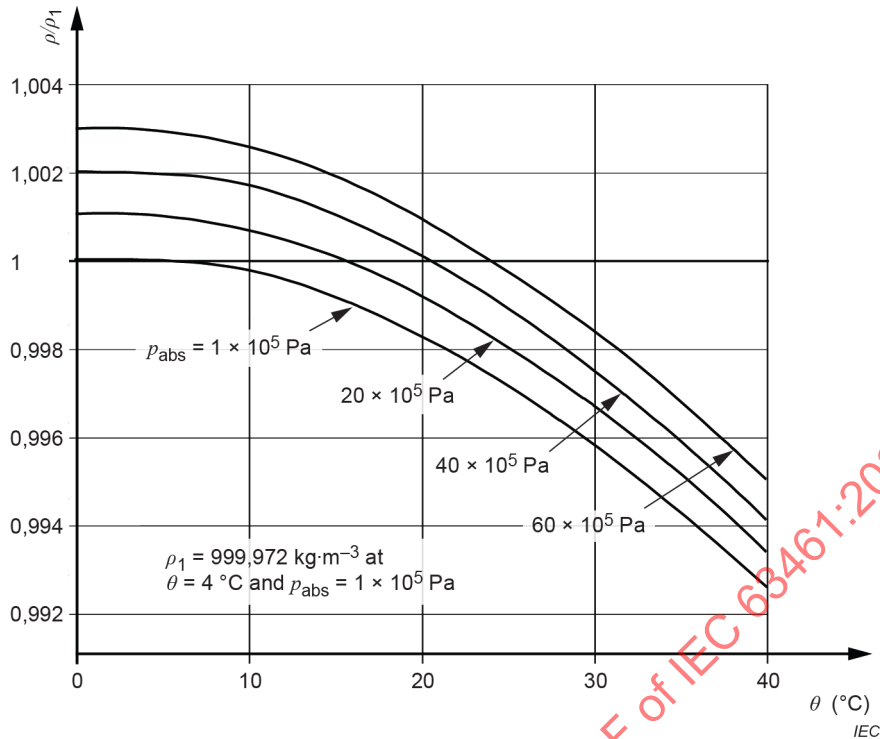


Figure 7 – Density of distilled water ρ_{wd} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

4.3.2 Kinematic viscosity

The kinematic viscosity ν (see 3.4.4.6) of water depends on its temperature θ and absolute pressure p_{abs} and is derived from the basic physical property dynamic viscosity μ using $\nu = \mu / \rho$.

A formula for μ is given in [10].

However, for practical reasons in hydraulic machinery, an approximate value of ν can be computed using the following formula:

$$\nu = e^{\left(-16,921 + \frac{396,13}{107,41 + \theta} \right)}$$

Using this equation, the average deviation from the standard values given in [11] is $\pm 0,05 \%$, the maximum deviation is $\pm 0,09 \%$.

The influence of pressure is negligible. The deviation for $p = 10 \times 10^5 \text{ Pa}$ against a reference pressure of $p = 10^5 \text{ Pa}$ is about $-0,05 \%$.

Values for ν are given in Table B.3.

4.3.3 Vapour pressure

The vapour pressure p_{va} (see 3.4.4.5) of water between the water temperatures of $\theta = 0^{\circ}\text{C}$ and $\theta = 40^{\circ}\text{C}$ can be calculated using the following empirical formula:

$$p_{va} = 10^{\left(2,7862 + 0,0312\theta - 0,000104\theta^2 \right)}$$

The resulting error is less than ± 7 Pa. Numerical values of p_{va} are given in Table B.4, see [5].

Attention shall be paid to dissolved chemical substances in water which can influence the vapour pressure.

4.4 Physical conditions of atmosphere

4.4.1 Density of dry air

The density of air ρ_a (see 3.4.4.4) as a function of p_{abs} (see 3.4.6.1) and temperature of air θ can be calculated using the following formula, in accordance with ISO 2533:

$$\rho_a = \frac{3,483\,7 \times 10^{-3} p_{abs}}{273,15 + \theta}$$

Values of ρ_a are given in Table B.5.

The influence of humidity on the density of air is negligible for the determination of E .

4.4.2 Ambient pressure

Normally, the ambient pressure p_{amb} (see 3.4.6.2) is the barometric pressure measured in the laboratory by a barometer. For conversion of test results to the conditions of prototype at site the ambient pressure shall be calculated using the standard atmosphere defined in ISO 2533.

Using sea level as the baseline reference, the ambient pressure may be calculated by the following approximate formula derived from ISO 2533:

$$p_{amb} = 101\,325 \left(1 - 2,256 \times 10^{-5} z\right)^{5,256}$$

where

z is the elevation (m).

The resulting error is less than ± 15 Pa. Values for p_{amb} from ISO 2533 are given in Table B.6.

4.5 Density of mercury

The density of mercury ρ_{Hg} (see 3.4.4.4) used in liquid manometers is calculated for pure mercury by the following equation:

$$\rho_{Hg} = (13,595 - 2,46\theta) \left[1 + 3,85 \times 10^{-11} (p - p_0)\right]$$

where

$p_0 = 101\,325$ Pa (standard ambient pressure at sea level)

Values of ρ_{Hg} are given in Table B.7, see [12].

Mercury used in practical applications can be contaminated by dissolved metal or by other materials. To ensure valid measurements the mercury shall be pure and clean.

5 Requirements of tests

5.1 Requirement of test installation and model

5.1.1 Choice of laboratory

Any laboratory satisfying the criteria set out in this document concerning general layout, capacity and quality of instrumentation should be deemed suitable. An independent laboratory is sometimes preferable, particularly when comparative tests are required with models from different manufacturers.

5.1.2 Test installation

5.1.2.1 General characteristics of the test circuit

Any entrained gas bubbles in the model shall not affect the functioning of instrumentation, particularly the flow measuring device and the pressure measurement lines.

The circuit shall be designed in such a manner that no leakage or addition of water can occur between the flow measuring instrument and the model. These criteria should be easily verifiable.

5.1.2.2 Capacity of the test installation

The capacity of the test installation (i.e. power, pressure, specific hydraulic energy and discharge) shall be such that the minimum values for model size and the required test conditions as listed in 8.5.2 can be met.

The operation shall be stable and steady without surging or fluctuating effects (see 8.5.3).

5.1.2.3 Condition of the water

The test water shall be clean, clear and free of any solid material in suspension and any chemical impurities which can have an influence on the water properties such as viscosity and vapour pressure. Free gas and air bubbles should be removed as far as possible before testing.

The water temperature should be within the range of 8 °C and 35 °C and not vary more than 5 °C per day. Large differences between the water temperature and the ambient temperature of instruments should be avoided, as they could influence the accuracy of the measurements.

5.1.2.4 Flow conditions given by the installation

At the model inlet, the test installation shall ensure favourable hydraulic conditions free from vortices, undue turbulence and unsteadiness.

At the model outlet, the flow pattern should not be influenced by the layout of the test facility.

5.1.2.5 Measuring instruments

The measuring equipment used to determine the main parameters shall satisfy the specified conditions of this document.

The traceability of each instrument to a recognized national or international standard shall be ensured. All instruments, especially discharge and torque, should be calibrated *in situ*. Some calibrations can be performed prior to installation on the test rig e.g. calibration of the dynamic instruments.

The measuring instruments should be such that a parallel reading, independent of the data acquisition system, is possible in order to permit an easy verification.

The instrument temperature shall be verified to be within the allowable specification of the manufacturer.

5.1.3 Model requirements

5.1.3.1 Model size

The required minimum values for model size are given in 8.5.2.

Normally, models shall be as large as practical but never less than the values stated. The same model should be used for all tests related to main hydraulic performance (see 9.2). Comparative model tests shall be performed with models of the same size.

5.1.3.2 Layout and mechanical design of the model

The layout and mechanical design of the model shall comply with the specified items of testing. The following points are rigorously considered:

- deformations due to loading under the chosen test specific hydraulic energy shall be minimized by appropriate design and choice of material;
- moveable elements used to vary machine geometry (nozzles) shall be capable of repeating and maintaining a set position;
- bearing system, shaft and stationary parts shall have sufficient rigidity to avoid contact in normal operation;
- hydraulically smooth surfaces of the water passages are recommended;
- in addition to general requirements for surface conditions, great care should be given to the proper matching of joints in order to avoid any local flow separation;
- materials should be chosen to avoid oxidation and electrochemical corrosion. The water passage surfaces should remain in good condition for the test duration;
- provision shall be made for easy cleaning or repairing of water passages;
- a transparent cone or windows should be provided for observation of the flow in the housing;
- where additional data have to be measured (velocity distribution) the model shall permit easy installation and checks of the corresponding measuring equipment;
- when it is required to proceed to an optimization or modification of the individual component (e.g. nozzles, casing inserts, etc.), the model shall permit easy installation of various configurations;
- if any non-homology exists, any analytical procedures adopted to account for these differences shall be mutually agreed.

5.1.3.3 Extent of model

The position of reference sections and the extent of the water passages from inlet to outlet to be included in the model (at least the part between the high-pressure and low-pressure reference sections) shall be clearly defined in the contract (see Figure 1 and as examples Figure 8 and Figure 9).

The homology limit on the low-pressure section shall be defined by mutual agreement.

Attention shall be paid to the distance between runner center line and tail water level as well as to the geometry of the tail race channel, especially in case of tail water level influence measurements (see 10.3).

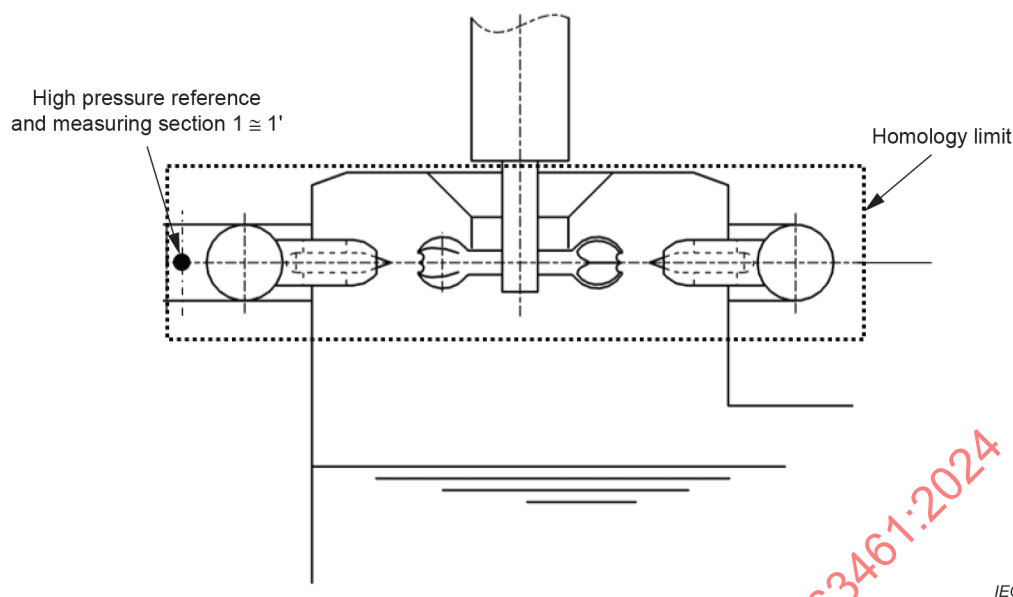


Figure 8 – Example for homology limits for wetted parts of a vertical Pelton turbine

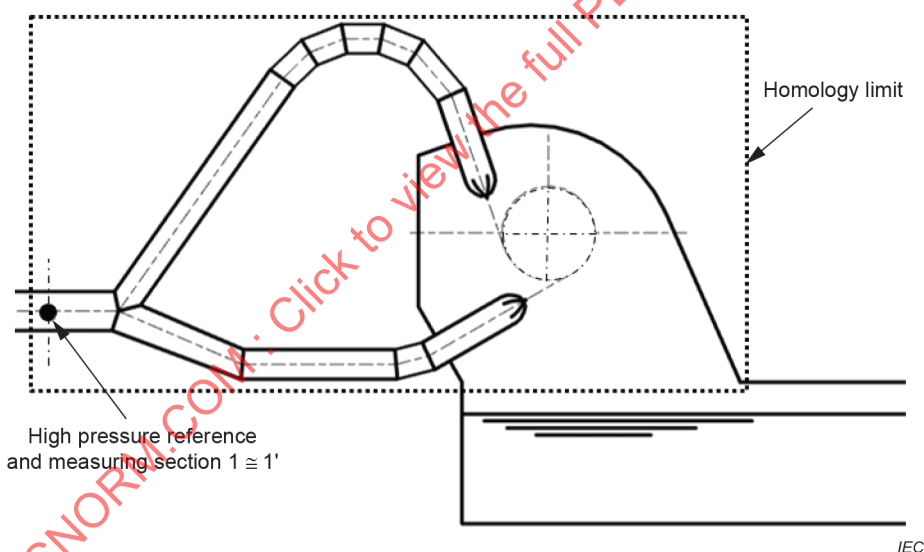


Figure 9 – Example for homology limit for wetted parts of a horizontal Pelton turbine

All the water passages influencing the performance of the prototype, i.e. inflow and outflow conditions, should as far as possible be included in the model.

Upstream or downstream gate slots are not required, unless they are located between the measuring or reference sections of the machine.

5.1.3.4 Geometric similarity of model and prototype

A basic requirement for determining prototype performance from model tests is to have geometrical similarity (homology) between model and prototype. Therefore, it is necessary to compare on both machines the geometrical dimensions and the surface finish of all components in contact with the flow.

The geometric similarity between model and prototype shall be checked in accordance with 5.2.

Unless otherwise specified, the model shall be geometrically similar (homologous) to the prototype in all wetted parts within the limits defined in 5.1.3.3. This also includes details that can have a measurable influence on the performance. However, in particular cases where some minor deviations from the similarity cannot be avoided, an agreement shall be reached to determine if the results are to be corrected.

Some specific configurations can have a measurable influence on the turbine behaviour, such as heat exchangers in the tail race. An agreement shall be reached whether specific measurements or actions shall be made.

On the prototype, any non-homology or deviations that can occur during manufacturing or installation should be evaluated and corrective measures shall be mutually agreed to reduce the influence on hydraulic performance.

All abrupt changes should be corrected. It is recommended to use at least a ratio of 1:10 to correct the transition area.

On the prototype, in addition to general requirements for surface conditions, great care should be given to the proper matching of joints for all components in contact with the flow in order to avoid any local flow disturbances.

The direction of rotation has no measurable impact on performances and can differ between model and prototype.

In the case of acceptance tests on both model and prototype, the same measuring sections should be used if possible. If not possible, an agreement shall be reached to determine if the results are to be corrected.

For comparative model tests, all models should rotate in the same direction.

5.2 Dimensional check of model and prototype

5.2.1 General

As stated in 5.1.3.4, the geometrical similarity between model and prototype shall be checked.

To provide information on major and relevant geometric details that influence the hydraulic performance, the checking procedure and admissible tolerances are described below.

These tolerances shall be considered as maximum permissible values to ensure the geometric similarity and measurable influence on performance. In any case, these tolerances are reflecting the technical accuracy achievable in manufacturing.

Due to the improvement in manufacturing processes, it is quite common to have, by mutual agreement, more stringent homology requirements than those provided in 5.2.9.

The geometrical homology (openings, angles and waviness) becomes more consistent if the profile is entirely CNC machined as it is a common practice in the industry for runner manufacturing.

This applies even in the case where the model is manufactured according to an existing machine and hence the prototype is the starting point of the process.

5.2.2 Explanation of terms used for model and prototype

General terms used for model and prototype:

a) individual value

The value resulting from:

- the measurement of the dimension of the same element of the same component taken at different locations (e.g. reference diameter of a runner);
- or
- the measurement of the dimension of the same element of different recurrent components taken at the same location (e.g. bucket width).

b) average value

The value is the arithmetical mean value calculated from several individual values.

c) theoretical value

The design value indicated on a drawing. Corresponding model and prototype component lengths L_M and L_P are linked by the length scale ratio λ_L (see 3.4.3.5).

5.2.3 Purpose of dimensional checks

Dimensional checking:

- a) ascertains the main dimensions of model and prototype;
- b) checks the uniformity of model and prototype in their recurrent components, i.e. compares the relative deviation between the individual values and the corresponding average value. The permissible maximum deviations are given in the "uniformity tolerance" columns of Table 2;
- c) checks the geometrical similarity between prototype and model, i.e. compares the relative deviation between the average prototype value and the corresponding average model value scaled up by λ_L . The permissible maximum deviations are given in the "similarity tolerance" columns in Table 2. This includes verification of the relative position between all the components compared with each other (see 5.2.4);
- d) compares the measured geometrical shape or 3-D profile with the theoretical geometry, e.g. single bucket before assembly.

5.2.4 General rules

At the contract stage, the methods used for the dimensional check shall be mutually agreed. If this has been omitted, an agreement shall be made before the acceptance model test at the latest.

In practice, the reduced scale physical model is compared with the design values to fulfil similarity requirements. However, the actual similarity shall be fulfilled between the reduced scale model and the physical prototype. During the dimensional check of the prototype, the reduced scale model data shall be used as reference.

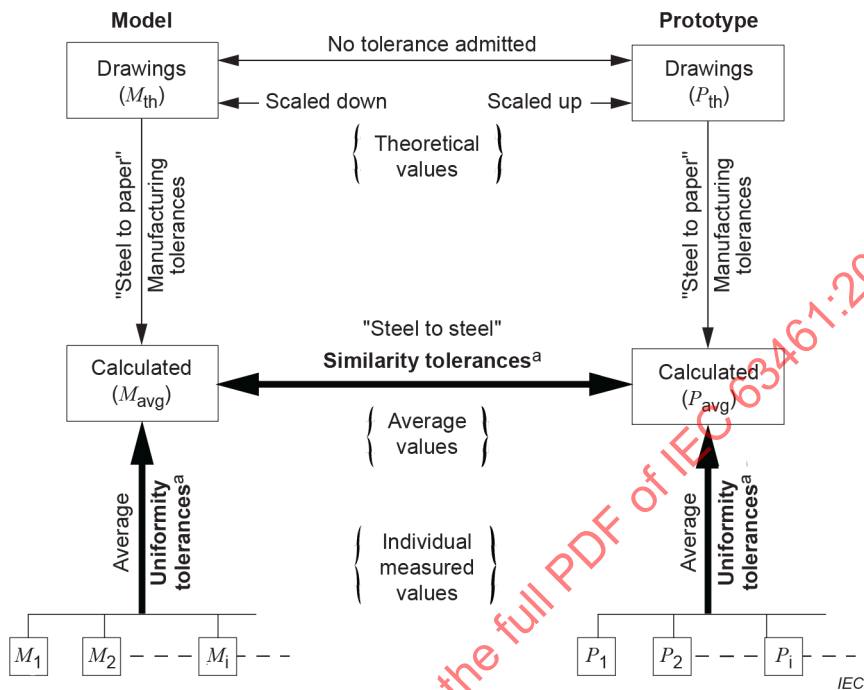
As the prototype is usually not physically available at the time of model testing, a comparison with design values is sufficient.

If the measured deviation between the physical model and the theoretical design exceeds half of the allowed maximum tolerance (see 5.2.9), the prototype shall be manufactured in a way that the total deviation stays within this tolerance. Furthermore, the prototype manufacturing tolerance shall be revised accordingly. Addition of tolerances to the theoretical design is not permissible. Alternatively, the manufacturer is allowed to revise the prototype manufacturing dimensions to be in accordance with the average value measured during the acceptance model test.

5.2.5 Procedure

5.2.5.1 Geometrical tolerances to consider

Figure 10 illustrates schematically the application of the geometrical tolerances given by this document, on individual and average values of model and prototype.



^a Numerical values of similarity tolerances and uniformity tolerances are given in 5.2.9.

Figure 10 – Procedure for dimensional checks, comparison of results "steel to steel" and application of tolerances for model and prototype

5.2.5.2 Uniformity of model and prototype components

By comparing the measurement of individual values with the corresponding average value, it is possible to determine if the uniformity requirements of model and prototype components have been met.

If the uniformity requirement is not fulfilled, agreement shall be reached on what components are to be corrected or remanufactured.

In the case where the difference between the average value and the theoretical value is outside the uniformity tolerance, it shall be agreed whether the theoretical value or the geometry of the component shall be corrected.

Where spot-checks are performed, i.e. when not all recurrent components or dimensions are checked, it can be agreed that the individual values are compared directly with the theoretical value.

5.2.5.3 Geometric similarity between prototype and model

By comparing the corresponding average values of model and prototype and considering the similarity tolerances as given by this document (see 5.2.9) or as per contract requirements, it can be determined whether the geometric similarity requirement has been met. If agreed, the corresponding theoretical values can be substituted for the average values.

If the deviations are greater than the similarity tolerances, further steps shall be agreed which could include a new test with the corrected model.

The theoretical prototype dimensions shall have significant digits that comply with the dimensional tolerance.

For some dimensions (e.g. overall dimensions) which are difficult to measure on the model or prototype, it can be agreed that, instead of average values of model or prototype, theoretical values can be used for comparison, provided that the sum of manufacturing and installation tolerances is less than the similarity tolerance.

5.2.6 Methods

5.2.6.1 General

To measure the shape and check the homology of the runner, individual profiles of the model and prototype buckets, as well as assembled runners shall be measured using coordinate measuring machines (CMM), optical measuring systems, templates, etc.

To check absolute positioning of the blades on assembled runners/impellers, templates or equivalent methods should be used.

For witness tests on model runners/impellers, if CMM is used and the dimensional check according to 5.2.9 are within tolerances, it is only necessary to check two adjacent buckets. The measured profile should then be graphically compared with the theoretical design.

CAD geometry and coordinates of hydraulic design check points are the intellectual property of the manufacturer. The manufacturer is not required to give the CAD geometry or the coordinates to the purchaser.

To protect the confidentiality and the intellectual property of the hydraulic design, the manufacturer shall report only the differences between the measured and the theoretical profile.

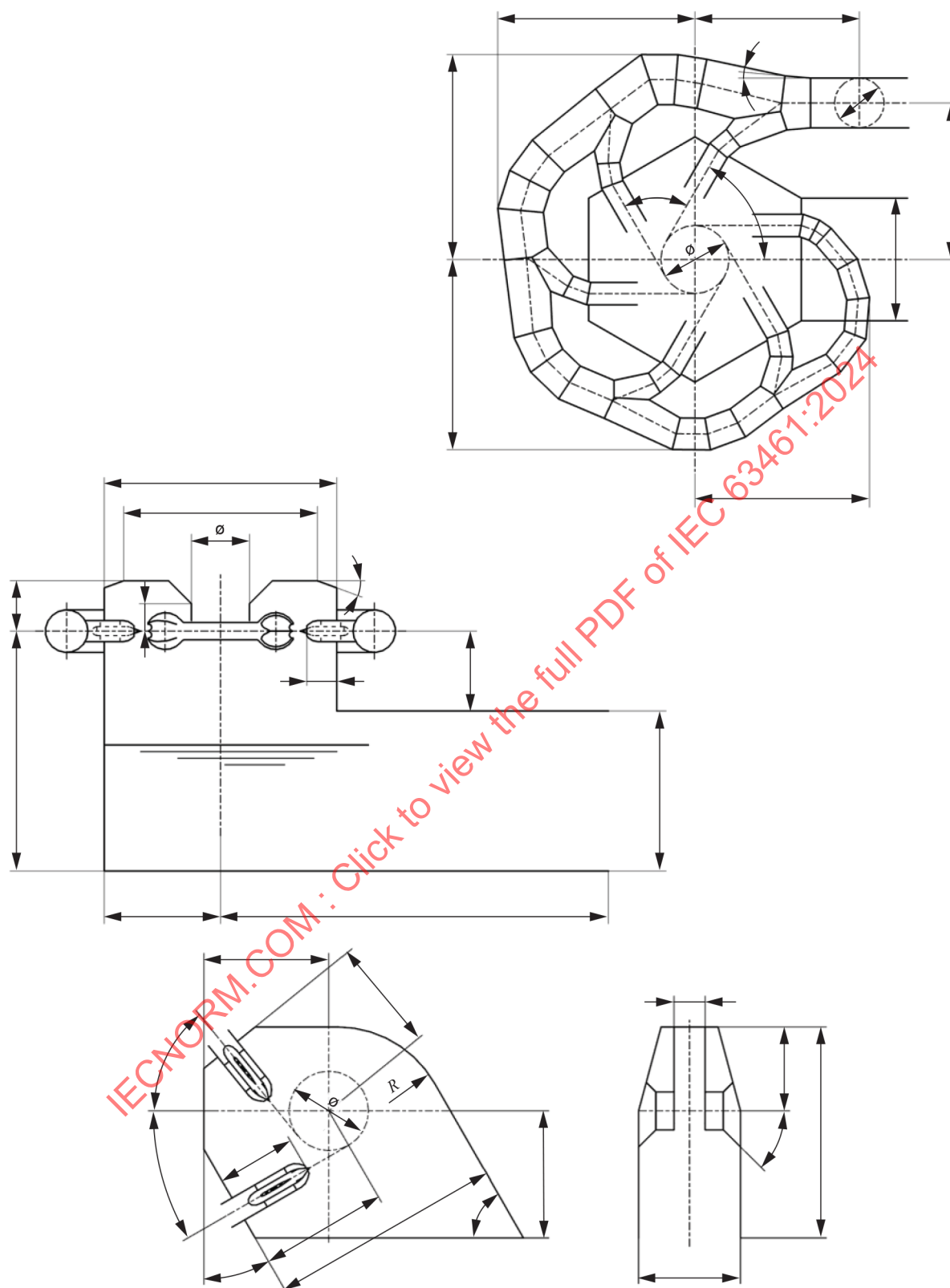
If further checks are required on either the model or prototype, the number, the coordinates of the check points and their storage format shall be defined by mutual agreement.

Considering the manufacturing and measuring methods of the runner/impeller, the manufacturer shall propose the most appropriate method and location of checking in agreement with the purchaser to demonstrate the geometric similarity between prototype and model.

Figure 11 to Figure 12 give examples showing schematically the location and extent of the geometric checking. However, the checking procedure is neither limited to the given examples nor does it mean that all of these dimensions should be checked.

If the outlet edge of the Pelton bucket is contained in a plane, it defines the bucket reference plane (see Figure 12). Else, the definition of the bucket reference plane has to be agreed upon.

When a length cannot be measured directly, e.g. if a point of intersection is covered by a fillet, the measurement shall be made according to an agreed upon procedure.



IEC

Figure 11 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the distributor and the housing of vertical and horizontal shaft machines

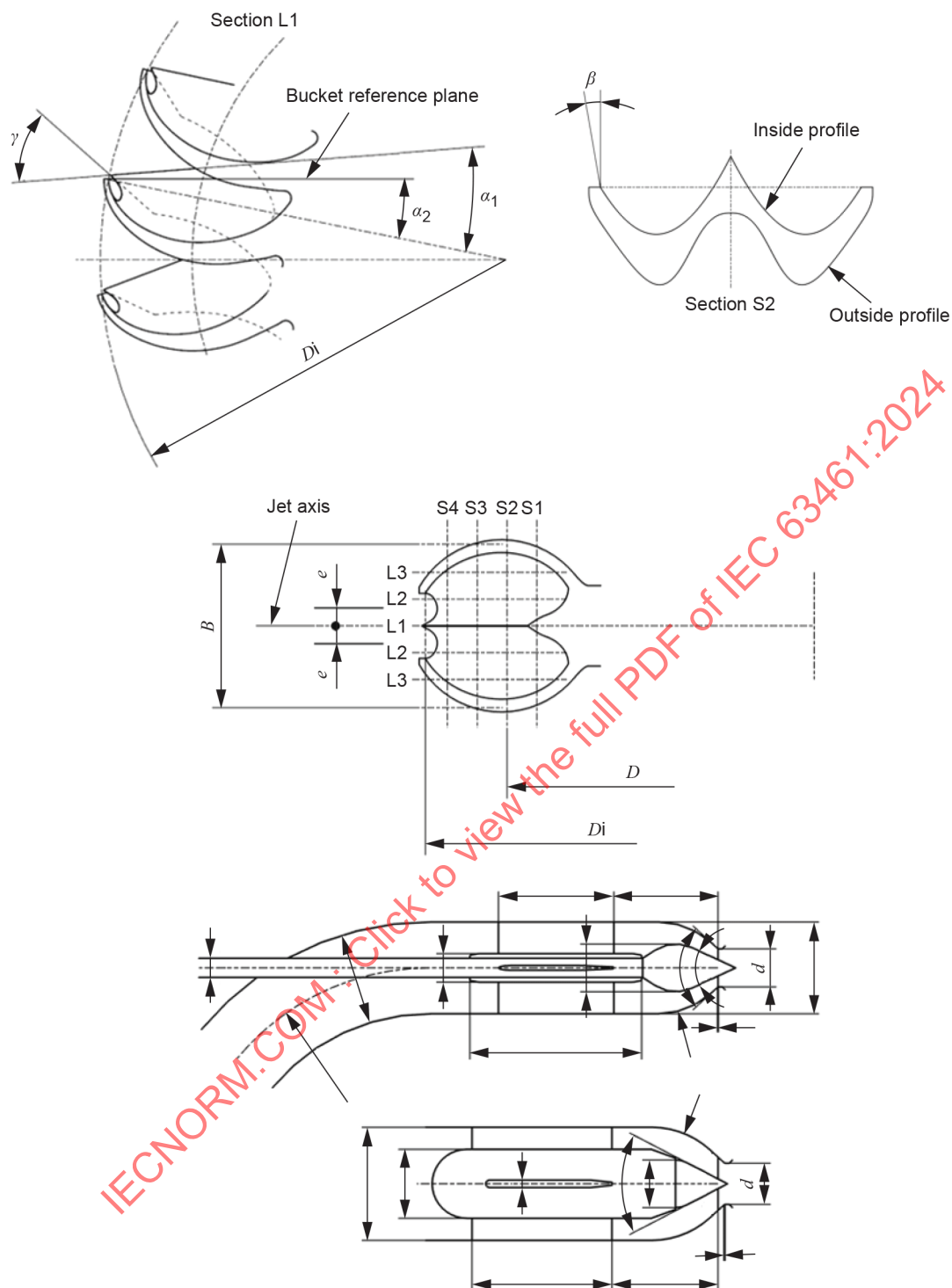


Figure 12 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the buckets and nozzles

5.2.6.2 Geometrical measurements using templates

The geometrical homology between model and prototype can be checked using templates. The templates should be homologous in size, offset and positioning between the prototype and the model. However, it shall be considered that it can be difficult to position the templates depending on the component.

5.2.6.3 Geometrical measurements using coordinate measuring machines (CMM)

Coordinate measuring machines are based on different methods and technologies. They can be classified by the type of the probe support system (e.g. bridge type, articulated arm), the probe type (e.g. mechanical, optical/scanner) or the type of control (e.g. manual, numerical). Regardless of type, all CMM machines supply a large number of 3-D coordinate points that are recorded in a data file and then processed with dedicated software.

The measured data can be processed in several ways; for example, if mechanical probes with spheres are used, the measured centre point of the probe is corrected with the sphere radius. For these tasks, dedicated software is available with the CMM.

Prior to the dimensional check, a preliminary check of the certificated CMM shall be performed with a calibrated standard.

To check the homology by CMM, the relevant CAD part of the theoretical design shall be used. Therefore, the purchaser shall be able to check that the same CAD geometry is used during the model and the prototype homology check. To protect the Intellectual Property (IP) of the manufacturer, the following methods can be used:

- a) CMM template mode:
 - In general, four longitudinal and four transverse sections per bucket are required . Absolute coordinates of a total of approximately 100 points are given to the purchaser.
- b) CMM mapping mode:
 - Arbitrary number of points is measured on the model;
 - ASCII (text) file with coordinates is stored and digitally signed with officially verified algorithm (like NIST FIPS 180-4 or SHA-3) or kept in a sealed envelope;
 - The manufacturer shall supply the purchaser with results presenting the deviations from the theoretical hydraulic design;
 - During the check of the prototype, the ASCII file with the coordinates is used to demonstrate that the CAD geometry used is the same as during the model check (except that the values shall be scaled from model to prototype).

These methods provide only some examples of how to protect the confidentiality of the theoretical design of the manufacturer. The list of examples is not complete and any procedure mutually agreed upon can be used.

5.2.7 Accuracy of measurements

As a detailed description of methods and measuring accuracies goes beyond the purpose of this document, the following recommendations are given:

- A detailed description of the used instrument together with a description of the assorted accuracy and repeatability shall be given;
- The total error consists of the error caused by the coordinate system positioning, plus the systematic error of the measuring instrument and the random error;
- A best fit of data computed by CMM can only show if the surface of a single component itself is according to the drawing, but does not guarantee that the component be positioned correctly in the 3-D space or relative to other components.

5.2.8 Dimensions of model and prototype to be checked

5.2.8.1 General

The dimensions of all significant components defining the water passages shall be checked to an extent agreeable to the parties concerned.

The relevant dimensions and tolerances for Pelton turbines are defined in 5.2.9. When a location is defined by more than one dimension, the tolerance applies to only the most relevant dimension. Whenever possible, the dimensions of the wetted water passage shall be used.

A check of geometric similarity comprises both:

- a) a check on the homology of the individual components before assembly. For practical reasons the dimensions shall refer to the component itself;
- b) a check on the homology of the whole machine, i.e. with the components assembled. The relevant overall dimensions usually refer to the runner axis. Special attention shall be paid to water passages formed by the transition between adjacent components, stationary or rotating, for which no general value of tolerance can be required in this document.

In 5.2.8, the permissible maximum deviations refer either to the corresponding scaled model average value or to the following reference dimensions:

- D reference diameter (see Figure 2);
- P_i bucket pitch;
- d nozzle orifice diameter (see Figure 12);
- B maximum inside width of runner bucket (see Figure 12).

The terms used in the following subclauses to indicate the various components of hydraulic machines are defined in IEC TR 61364.

5.2.8.2 Main wetted components

5.2.8.2.1 General

The main components to check:

- the principal dimensions of the runner, manifold, housing and nozzles (see Figure 11);
- the number of buckets;
- the form of buckets, nozzles and needles (see Figure 12);
- the alignment of the jets to the runner;
- the surface roughness and waviness of the buckets, nozzles and needles (usually only relevant for the prototype) (see 5.2.10.2 and 5.2.10.3).

5.2.8.2.2 Pelton turbine runner

The profile of at least one bucket shall be checked at a minimum of four transverse and four longitudinal sections or randomly on the whole surface. See Figure 12. Special attention shall be paid close to the cutout and outlet edge.

The bucket position and inclination in the runner shall be checked. See Figure 12.

The discharge angle β of each bucket shall be checked at four points on each side. See Figure 12.

The form of the cutout, the angle γ of the back of the cutout, the splitter edge and the bucket inclination α shall be checked on minimum three buckets. See Figure 12.

The bucket inside width and profile shall be checked.

The bucket outside profile shall also be checked. To ensure that the interference between the jet and the bucket on the prototype is always less than that on the model, the tolerances of the outside profile shall be applied to the bucket discharge area which can influence this interference. See 5.2.9.

5.2.9 Permissible maximum deviations in geometrical similarity between prototype and model

The following points apply:

- the reference value is taken to be scaled model average ($\lambda_L L_M$), unless otherwise indicated;
- where the bucket surface is sufficiently defined, the independent determination of angles can be omitted;
- if a complete bucket profile is provided, the bucket thickness T is not required.

Table 2 – Permissible maximum deviations

	Reference value	Permissible maximum deviation		
		Uniformity tolerance		Similarity tolerance
		Model	Prototype	Prototype/Model
		Individual value to average value	Individual value to average value	Prototype average value to scaled model average value ($(L_P - \lambda_L L_M)/(\text{reference value})$)
Metallic or concrete water passages (manifold, housing, tailrace channel)	Average value	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 1 \%$
Needle and nozzle diameter	d	$\pm 0,3 \%$	$\pm 0,3 \%$	$\pm 0,3 \%$
Needle and nozzle profile	d	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$
Lengths of injector (torpedo, rib)	Average value	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$
Rib thickness	Average value	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$
Nozzle angle	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Needle angle	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Bucket inside width B	Average value	$\pm 0,3 \%$	$+0,8$ $-0,5 \%$	$+0,8$ $-0,5 \%$
Bucket outside profile	B	$\pm 0,5 \%$	$+1$ $-0,8 \%$	$+1$ $-0,8 \%$
Bucket inside profile	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$
Bucket inclination α	1	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Bucket discharge angle β	1	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Cut-out profile (inside / outside)	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$
Jet circle diameter D	Average value	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$
Offset of jet to runner e	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,25 \%$
Alignment of jet to runner δ	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
Bucket pitch at outer diameter P_i	B	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$
Bucket thickness at outlet	B	$+1$ $-0,5 \%$	$+1$ $-0,5 \%$	$+1$ $-0,5 \%$
Bucket tip diameter	D	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$

5.2.10 Surface waviness and roughness

5.2.10.1 Geometrical characteristics

5.2.10.1.1 Waviness

Waviness is the deviation of a surface profile from a smooth design curve. Waviness is expressed as the ratio of maximum deviation to distance over which the deviation from the smooth curve occurs. This is the ratio X/U of Figure 13. A flexible stick that readily conforms to the bucket shape is an example of a tool that can be used to evaluate waviness. In order to distinguish waviness from surface roughness, U should be not less than 50 mm. The point of maximum deviation X should be in the middle third of U .

Bumps on the surface are more difficult to assess than hollows. However, bumps are typically easier to correct.

5.2.10.1.2 Surface roughness

Surface roughness is the characteristic quality of the surface due to small departures from its general form such as those produced by the cutting action of tool edges, abrasive grains, feed of the machine, coating and painting or originally produced by the fabrication (welding) process.

It is characterized by the roughness criterion R_a (arithmetic mean deviation of the assessment profile) as defined in ISO 4287:1997.

5.2.10.2 Waviness requirements

To fulfil geometrical homology requirements, prototype waviness shall be measured and the maximum permissible values are listed below.

The whole surface of the main wetted components as described in 5.2.8.2 shall be checked to establish that profiles are smooth continuous curves with a waviness value of less than $\pm 0,01$.

For surfaces having a profile variation with contact points distance between 10 mm and 50 mm, acceptable waviness shall be less than $\pm 0,02$. It is important to highlight that the waviness criteria as defined is used to evaluate a continuous surface after machining and grinding. This excludes any waviness that is part of the design profile.

In the case of CNC machined components, the accuracy of the manufacturing process with a waviness value of less than $\pm 0,004$ and $\pm 0,002$ for surfaces subject to cavitation should be achievable. A fully controlled machining process (for example, by limiting the scallop height to 0,2 mm between two adjacent passes) should assure a smooth continuous profile within the recommended waviness values after grinding.

For waviness measurement, typical minimum distance between contact points between two peaks should not be less than 10 mm. If the contact point distance is less than 10 mm, then the waviness measurement should be replaced by roughness measurement.

Waviness criteria should never be used to assess holes, defects, porosity, lack of material, any abrupt changes in surface profile or matching of joints.

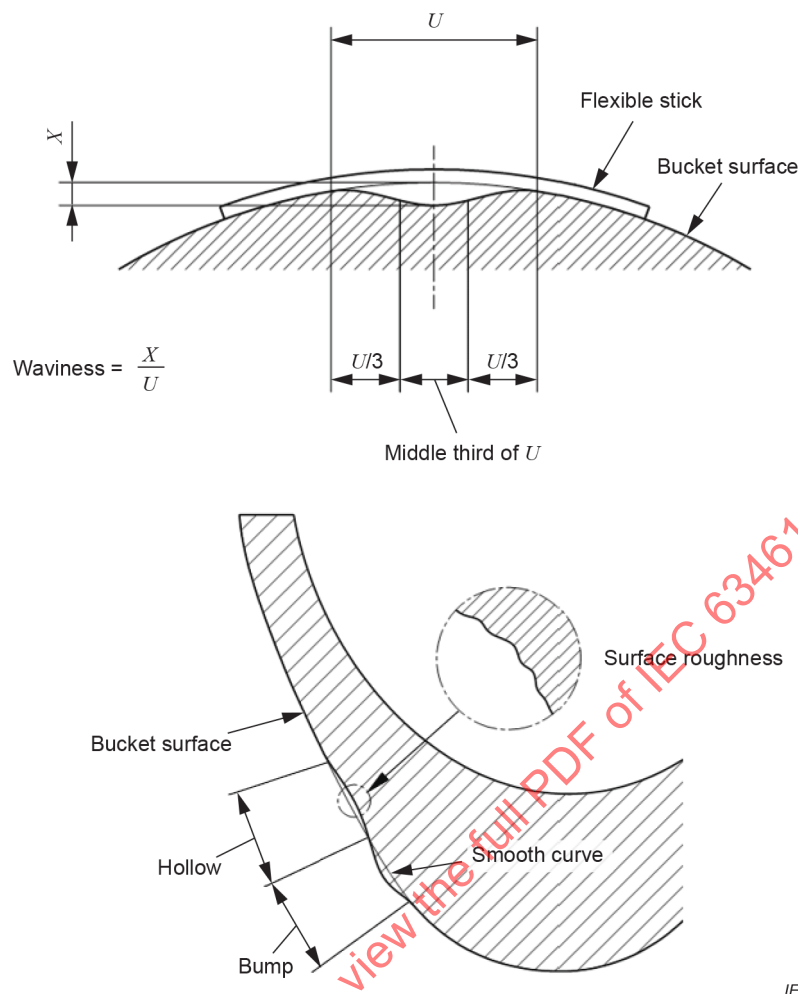


Figure 13 – Definition of waviness and surface roughness

5.2.10.3 Roughness requirements

Rough surfaces in the water passages of both model and prototype machines reduce the efficiency below the value that is potentially achievable.

If the effect of surface roughness on performance is not considered, both the model and prototype should be such that hydraulically smooth flow is achieved. However, this is difficult to achieve on the prototype. Therefore, maximum recommended values of prototype surface roughness are provided below.

The recommendations for surface roughness values are given in Table 3 for various types of machines, corresponding approximately to machines with lower to medium head and to machines with high head.

The values of prototype surface roughness are valid for the finished condition of the surface. This means that if the hydraulic wetted components have painted or coated surfaces, this condition shall be checked.

Moreover, the finish required may be chosen at some locations to improve cavitation resistance or for fatigue reasons; then the choice of finish is not related to model-to-prototype dimensional similarity.

The values given in Table 3 are maximum recommended values for the total surface of the component involved, finished surfaces and eventual painting included. The maximum surface

roughness as recommended in Table 3 does not necessarily yield hydraulically smooth flow conditions.

Table 3 – Maximum recommended prototype surface roughness Ra

Component	Ra μm			
	E	$> 5\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	E	$> 5\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
Wetted surfaces of buckets, nozzle needle and orifice:		$\leq 3,2$		$\leq 1,6$
Nozzle wetted surfaces:		$\leq 6,3$		$\leq 3,2$
Dry bucket surfaces		$\leq 12,5$		$\leq 12,5$
Manifold:		$\leq 25,0$		$\leq 12,5$

5.3 Test procedures

5.3.1 Organization of tests

5.3.1.1 General

When planning model tests, Subclauses 5.3.1.2 to 5.3.1.7 covering general aspects of preparation, organization and realization shall be clarified and agreed on by the parties involved.

5.3.1.2 Specification for model tests

A specification for model tests is the basis for planning and preparing a model acceptance test and for drafting the detailed technical programme of tests (see 5.3.3.2). This model test specification is often part of the general technical or commercial specification for a whole project issued by the purchaser or its representative.

Among other items, the specification for model tests shall define:

- object, scope and extent of model tests;
- reference to guaranteed and specified plant data;
- reference to test standards;
- model scale and/or size;
- place(s) where the model(s) is (are) tested;
- documentation of results (test reports);
- time schedule indicating, at a minimum, start and end dates of work for model testing;
- model property ownership and/or storage.

5.3.1.3 Time schedule

A time schedule should be agreed on, which indicates as a minimum, the different stages, deadlines or duration for the following items:

- submission of model drawings (especially those showing model construction and principal dimensions of model high and low-pressure side at the transition to the test rig);
- submission of the test procedure containing a description of testing equipment (including methods of calibration, calculation and representation of results and expected uncertainties of measurement);

- calibration of instruments;
- check of model geometry;
- preliminary and acceptance (or witnessed) tests and sequence of models to be tested in the case of comparative model tests;
- test reports.

The manufacturer shall always be given sufficient time to manufacture the model, making all necessary dimensional checks and carrying out his own preparatory tests, whether in his own laboratory or elsewhere. In case of test equipment defects or model machine defects arising during preliminary or acceptance tests, a mutual agreement is necessary to modify the time schedule or the test programme.

5.3.1.4 Personnel and responsibilities

It is important that the responsible persons of the purchaser or his representative, of the supplier, and of the independent laboratory (if any) are designated in ample time before test commencement. Their responsibilities and authority shall be clarified, so that any problems arising during the preparation for and conducting of tests can be quickly resolved. Both purchaser and supplier shall be entitled to have authorized representatives present at all contractual tests, inspections and dimensional checks of the model and prototype, in order to verify that they are performed in accordance with both this document and any prior agreement.

For the carrying out of tests (as defined in 5.3.3.1), a chief of tests shall be designated. The chief of tests can be selected from the technical staff of the laboratory where the model is tested or, by special agreement between the parties, an independent expert can act as chief of tests. The chief of tests will assume full responsibility for the correct calibration of instruments, execution of tests and computation of results, including determination of uncertainties of measurement and documentation of results in the final test report. The chief of tests shall consider any remarks or suggestions by any of the officially authorized representatives of the parties attending the tests.

When model tests are conducted in an independent or external laboratory, the supplier may be present during all activities for the test of his model, including the installation and any preparatory tests. During the installation, the supplier can provide his own qualified personnel to participate.

The tests shall be carried out by personnel having experience with the test equipment.

5.3.1.5 Design of the model and preparation of the test installation

In order to prepare the model and the testing equipment, the technical specification for model tests (see 5.3.1.2) shall provide all relevant details for design and manufacturing of the model machine (see 5.1.3.2) such as:

- extent of the water passages to be modelled on the high- and low-pressure sides;
- location of the pressure measuring sections;
- number and location of observation windows;
- provisions for exchange or adjustment of model components;
- provisions for special tests (video or photo recording, deflector torque or needle force measurement, aeration, etc.);
- test conditions for all types of specified tests;
- adjusting range for geometric parameters (e.g. maximum needle stroke, etc.);
- possible geometry simplifications imposed by the model manufacturing with no impact on performances.

In addition, sufficient data defining the extent and conditions for all the tests shall be given to enable the model to be constructed and prepared according to the state of the art. It is then possible to select the appropriate test facility, and to check the general arrangement of the model in the test rig, modifying or rearranging some of the existing components of the test rig if necessary.

It is recommended that inflow and outflow parts as well as the definitive location of the pressure measuring sections and the number of pressure tapings are agreed upon at an early stage of model design.

5.3.1.6 Instrumentation and processing of test data

The person responsible for the selected laboratory or chief of tests shall provide the purchaser, or his representative, with a description of the standard instrumentation installed on the test rig, including details on the measuring and calibration methods, on the processing of calibration and test data and on documentation of results.

In some laboratories, there are two or more instruments permanently installed for measuring a particular quantity. One shall be selected as the instrument with measuring signals or indications that are to be used in calculating the results, and the other(s) shall be used only for reference and functional control purposes.

Sometimes the calculation of test results occurs in several steps using more than one computer system. In this case, the evaluation procedure for the quantities concerned shall be defined in detail. It shall be agreed which quantities are processed on-line and immediately presented on records or diagrams, and which test results are calculated and documented later.

5.3.1.7 Dimensional checks

The components which shall be checked before, during or after the acceptance tests shall be specified. The methods to be used for dimensional checks and the approximate extent and number of dimensions to be checked (see 5.2) shall be agreed in sufficient time to enable relevant documents and measuring equipment to be prepared accordingly. If mutually agreed by the parties, spot-checks during the acceptance tests may be carried out.

5.3.2 Inspections and calibrations

5.3.2.1 General

Shortly before the start of the preliminary or acceptance tests, the model, the test rig, the instrumentation and the data acquisition and processing system shall be thoroughly inspected by the representatives of the parties and the chief of tests, to ensure that the test results are not affected by any mechanical, structural or other defects of the model or the testing equipment.

All measuring instruments should be calibrated against primary methods or secondary methods with certificated instruments (as explained in 7.1 to 7.5) prior to the tests and also after completion of tests if one of the parties so desires. Recalibrations during tests is necessary if serious problems with the standard measuring equipment occur, such as a defect of an instrument or a measuring chain or a significant and systematic deviation of a measuring signal at zero or reference conditions.

The methods to be used, the extent of various calibrations (spot-checks or complete calibration) and the procedure shall be agreed on by the parties before beginning the preliminary or acceptance tests. Based on certified documents produced by the responsible of the laboratory or chief of tests, it may be mutually agreed, for certain instruments, that the latest existing calibration data be used without further calibrations or checks.

5.3.2.2 Inspection of the model machine

Items to be checked or recorded are:

- identification of model components by means of the corresponding model drawings (especially if it is planned to exchange or modify certain components during testing);
- geometric dimensions as listed in 5.2;
- characteristic dimensions used for calculation of test results (e.g. areas of high-pressure and low-pressure measuring sections);
- individual and average values of needle openings;
- surface quality, impurities and local faults in the different components;
- proper matching at the joints of components;
- compliance with reference dimensions on the model drawings.

If necessary, these checks shall be repeated if mechanical faults or defects occur during the tests (see 5.3.4), or at the end of witnessed tests, in the presence of the authorized representatives of all parties concerned. These checks are part of the official acceptance test.

5.3.2.3 Inspection of the test circuit

As a minimum, the following checks shall be carried out:

- no water leakage or supply shall occur between the model and the discharge measuring section;
- no water leakage shall occur at pressure tapings and measuring lines;
- flow conditions close to the model inlet and outlet and close to the discharge measuring section shall be regular. The water passages shall have no disturbances and the wetted surfaces shall be of good quality;
- the booster pumps and regulating devices (valves, supply of water and pressurized air, etc.) shall work properly;
- the water quality and temperature shall be stable (see 5.1.2.3).

If necessary, some checks shall be repeated at the end of the acceptance tests, in the presence of all parties concerned.

5.3.2.4 Calibration of instruments and check of the data acquisition system

It shall be agreed by the parties concerned:

- to what extent the various instruments shall be calibrated or spot-checked;
- if all instruments require to be spot-checked or calibrated before and after acceptance tests;
- the conditions for the recalibration of an instrument during or after acceptance tests;
- range of calibration and number of calibration or check points for the various instruments;
- the basic data and the procedure for evaluating the uncertainties due to systematic errors related to the calibration data and to each measured quantity.

Before and after the acceptance tests, as a minimum, the following checks or measurements shall be made:

- identification of measuring instruments or devices used;
- "zero readings", i.e. readings in well-defined conditions for the different instruments, to detect if any drifting effects occurred during the tests;

- check of the data acquisition system by repeated measurements in well defined operating conditions. Manual sample calculations shall demonstrate that acquisition, transmission and processing of test data work properly;
- measurement of mechanical friction torque in bearings and shaft seals that are not built into or connected to a stator of the swinging type (automatically yielding the torque on the runner), in order to decide if any further corrections should be applied.

The "zero readings" are usually checked during preliminary and acceptance tests. All the other checks and calibrations will be repeated, if necessary, at the end of the acceptance tests in the presence of all parties concerned.

If the differences between the two checks or calibrations compared are less than the uncertainty due to systematic errors evaluated at the beginning of the tests, the test data are valid and no correction needs to be applied. If, between the two calibrations or checks, differences greater than the anticipated uncertainty due to systematic errors occur in several points, the test shall be cancelled and repeated.

In order to ensure the validity of calibration results, it is essential to maintain the influence quantities (such as ambient temperature and humidity, power supply, electromagnetic field, etc.) within a reasonable range during calibration and during tests (see 6.3.2.2.2).

Any of the interested parties may, for declared and substantiated reasons, call for a recalibration of any instrument during the course of a test.

5.3.3 Execution of tests

5.3.3.1 Types of tests

5.3.3.1.1 General

To conduct an acceptance test successfully and efficiently requires good preparation by means of adequate preparatory tests. Depending on the results of preliminary and acceptance tests, performance of additional tests can be applicable.

For easier identification of the status of tests and for improved communication between the parties involved, this document defines the types of tests described in 5.3.3.1.2 to 5.3.3.1.5.

5.3.3.1.2 Preparatory tests

Often these tests are not specified in detail, but they are essential with respect to the quality of all further tests. They comprise:

- checks and tests to ascertain that model performance is not affected by any mechanical defects of model or test rig and measuring equipment;
- a check on the correct operation of the measuring equipment and data acquisition system.

These results are normally for internal use of the supplier or the laboratory only.

If mutually agreed, sufficient time should be allowed to the supplier during this period for the selection of definitive components or any last-minute adjustments, but these final development tests are not included in the scope of this document.

5.3.3.1.3 Preliminary tests

These are tests covered by the technical specification (see 5.3.1.2) or technical programme (see 5.3.3.2), and the extent is mainly dependent on the future use of the results. Therefore, the parties involved shall agree before beginning the tests, whether:

- the results are to be used for information only and have no contractual value. In that case, the preliminary tests are used only to explore the general behaviour or some limits of the model with respect to specified items;
- or whether the results will be used officially and have contractual value. In that case, these results are part of the official test data to be completed or spot-checked during the acceptance tests. For example, the results could be used to establish the efficiency step-up, as explained in 8.6.2.3, and the uncertainties due to systematic and random errors as explained in 6.3.2. However, such data shall be confirmed during the acceptance tests.

5.3.3.1.4 Acceptance tests (or witnessed tests)

These tests measure, establish or check all relevant model data which are defined by the technical specification (see 5.3.1.2) or technical programme (see 5.3.3.2), and which form the basis for comparison with guarantees or other contractually specified data.

All these results are of contractual value and shall be summarized in the final test report (see 5.3.6).

5.3.3.1.5 Additional tests

These are tests which supplement the results of preliminary and acceptance tests and which may include tests for additional data explained in Clause 10. Such tests may be witnessed.

These results are summarized in the final test report (see 5.3.6). However, their possible contractual value shall be agreed on.

5.3.3.2 Technical programme

A technical programme, referring to the technical specification (see 5.3.1.2) and the relevant contractual guarantees and data, shall be established in advance and agreed upon by the parties involved. If not covered by the contractual documents, the programme shall define the purpose and the extent of the various types of tests to be performed during preliminary or acceptance tests. To allow efficient progress in testing and documentation, the following shall be specified for each type of test, such as main hydraulic performance tests, runaway tests, etc.:

- ranges of hydraulic parameters to be varied and corresponding increments, to define the number and distribution of test points;
- test conditions to be maintained constant, i.e. usually the test speed (or specific hydraulic energy);
- number and type of test data to be recorded and the method of recording;
- definitions, formulae and procedures (see 8.6.1) to be used for calculation of model and/or prototype results;
- guidelines for graphical representation of test results.

If necessary, for the acceptance tests, the technical programme can be supplemented, in order to clarify and define, for example:

- extent and sequence of checks, calibrations and tests to be witnessed;
- recording and/or graphical representation of test data to be signed by the parties to the tests;

- number and definition of the test point(s) to be measured for a detailed sample calculation and for the evaluation of uncertainties due to systematic and random error for the determination of total uncertainties;
- preparation of a daily log and of a final protocol (see 5.3.3.8).

5.3.3.3 Data to be used for calculation of results

Before the beginning of preliminary or acceptance tests, the data and formulae to be used for calculation of model and prototype results shall be checked and agreed on. Such data are:

- area of high-pressure measuring section;
- geometric and hydraulic references and data of model and prototype;
- physical constants and properties for model and prototype;
- model friction torque (if not automatically compensated);
- calibration data for all relevant instruments;
- efficiency step-up procedure.

A sample calculation shall demonstrate the correct use of these data and explain the calculation procedure.

5.3.3.4 Signing and handling of test records

Complete records of measured model data and corresponding data at zero or reference conditions, as well as notes from inspections and calibrations, readings and observations during the acceptance tests or preliminary tests shall be agreed on and signed by the witnessing parties and by the chief of tests immediately on completion of each phase, and kept as a complete set by each party.

5.3.3.5 Performance tests

At least within the range of guarantee, the performance tests shall be carried out at constant test specific hydraulic energy. For computation of test results (see 8.6), it is preferable to perform the tests at constant water temperature (if possible). If, due to limitations of the model or the test installation, constant test conditions cannot be maintained, 8.6.2.1 explains the further processing required of such performance test results. It is recommended to determine the tailwater elevation at which performance is affected. This check is to be done at selected full-load operating points, by varying the tailwater level.

5.3.3.6 Runaway tests

The runaway test method depends on the design of the test rig, the instrumentation and the model design. If the test rig is, or can be, equipped with a driving motor to compensate friction torque due to shaft bearings and seals, it is usually possible to maintain $P_{mM} = 0$, and thus to establish directly the points of the runaway characteristics. If this procedure is not possible, the runaway conditions can be determined by extrapolation (as an example, see Figure 39) or by interpolation.

In most cases, the specific hydraulic energy is reduced, so that the highest speed that can be endured by the model or the testing facility is not exceeded. The influence of Reynolds and Froude numbers is assumed to be negligible in the range near to runaway.

The runaway tests shall be carried out with a sufficient variation of geometric parameters of the model machine, so that the most unfavourable combination of parameters and all specified conditions are covered. For multijet Pelton turbines, the maximum steady-state runaway speed shall be measured taking into account the most unfavourable combination of operating nozzles.

Subclause 8.6.3.1 explains how the model runaway characteristics are determined for Pelton turbines and Figure 39 give some examples of graphical representation of the runaway speed factor $n_{ED,R}$.

5.3.3.7 Tests to check additional data

The procedures applied for tests, such as:

- deflector torque;
- nozzle needle force;
- influence of tail water level on efficiency;
- etc;

are described in Clause 10, which details the relevant aspects of these additional tests.

5.3.3.8 Daily log and final protocol on acceptance tests

A daily log shall summarize, for each day:

- names of the persons participating in the tests;
- activities such as checks, calibrations, test series, discussions;
- agreements, decisions and unresolved issues with respect to test results;
- modifications of the technical programme or test programme.

At the end of the acceptance tests, a final protocol shall be established covering at least:

- purpose of acceptance tests;
- location and date of tests;
- names of persons participating;
- identification of the model or the model components;
- comments or conclusions on:
 - inspection of test rig, instrumentation and installation of the model;
 - calibration of instruments;
 - sample calculation (data acquisition system);
 - check of model geometry;
- discussion of results and comparison with guaranteed or specified data, covering at least:
 - performance tests;
 - runaway tests;
- conclusions regarding whether:
 - guarantees and specifications have been met;
 - test results are complete with respect to the technical programme and technical specification for the model tests;
- agreements on:
 - additional tests (if any);
 - documentation of test results;
 - shipment or storage of the model.

5.3.4 Faults and repetition of tests

5.3.4.1 Types of faults and consequences

During the acceptance tests, faults in the model, test rig, instrumentation or data processing may arise, such as:

- a) mechanical faults in the model:
 - bearing or seals of the model fail and effect a change of mechanical friction losses. Replacement bearings or seals need to be fitted, but the mechanical friction losses may have changed;
 - running clearances may have changed, effecting changes in hydraulic performance;
 - mechanical defect on runner or on other model components occurs.
- b) faults in the test rig or instrumentation:
 - unusual variations of speed, specific hydraulic energy or discharge are introduced due to faults in the auxiliary control systems of the test rig or due to malfunctioning of components;
 - additional leakage due to an open valve or a defect in the measuring leads is detected;
 - excessive shift of instrument indications at zero conditions before and after a series of tests is detected.
- c) faults in data processing:
 - malfunctioning of the data acquisition system may produce faulty test results;
 - faulty test results are produced due to incorrect reference or calibration data.

The correction of such faults shall be closely supervised by the chief of tests and all parties concerned.

In comparative tests, particular care shall be taken to ensure that none of the parties is advantaged from the results obtained up to that point. The tests shall be completed in the manner they began and without modification of the hydraulic design.

After correction of the fault, several preparatory tests or preliminary tests should be made to ensure that the model is behaving exactly as it was before the faults occurred. If its performance is proven to have changed, then by mutual agreement, the previous series of tests shall either:

- be allowed to stand, and no further tests be deemed necessary;
- or be declared invalid and the whole series of tests repeated.

5.3.4.2 Procedure for repetition of tests

Any of the parties shall have the right to require interruption or repetition of the tests, provided the chief of tests deems valid the reasons put forward, for example:

- unsatisfactory agreement between calibrations before and after tests;
- test rig, instrumentation or data processing malfunction;
- mechanical faults in the model;
- non-compliance, to a significant degree, with this document, except as otherwise agreed beforehand.

In such a situation, the other party(ies) or the chief of tests may also demand a repetition of the tests. It is recommended that the subject of repeated tests, repeated calibrations and the responsibility for the associated costs be subject to written agreement beforehand.

If no agreement can be reached on how to conduct such a repetition of tests or who is responsible for the additional costs, the matter shall be referred to an independent arbitrator acceptable to all parties.

5.3.5 Preliminary test report

A preliminary report can be prepared prior to witness tests. It shall cover the object of tests, description of model machine and test rig, test procedure, uncertainty and step-by-step calculation of a measuring point, measured efficiency and runaway speed tests.

5.3.6 Final test report

After completion of all tests according to the technical specification for model tests (see 5.3.1.2) and the technical programme (see 5.3.3.2), a final test report shall be prepared in accordance with the rules set out in this document and signed by the chief of tests. The parties shall agree whether a draft of the whole report or only selected chapters have to be approved before distributing the final version.

The final report shall cover primarily the following items:

- 1) object and purpose of tests, with reference to technical specification of model tests including relevant guarantees and other contractual data;
- 2) records of all agreements, and other essential documents pertinent to the tests;
- 3) personnel taking part in the tests;
- 4) description of the model machine together with drawings showing, as a minimum, the main section of the model and its general arrangement in the test rig;
- 5) description of the test rig and the measuring equipment, including calibration methods and data processing;
- 6) calculation of model test results and transposition to contractual model or prototype conditions (including consideration of scale effects, if any);
- 7) calibration data and inspection reports;
- 8) test procedures for the different types of tests;
- 9) log covering activities related to the specified tests and the sequence of different tests;
- 10) relevant test records and data sheets from measurements and observations of the various tests, together with the test results graphically represented. If mutually agreed, some of the data can be transferred electronically;
- 11) calculation of uncertainties of measurement with reference to the calibration data, results and further observations;
- 12) discussion and interpretation of test results and comparison with guaranteed and other contractual data;
- 13) conclusions as to whether or not the guaranteed and contractual requirements have been met, and the tests are complete with respect to the technical specification.

6 Data acquisition

6.1 Data acquisition and data processing

6.1.1 General

Data acquisition and data processing involve the conversion of measured signals into appropriate engineering units through a measuring chain of several components such as transducers, multiplexers, signal converters or conditioners, data storage equipment and computers. The final output is a presentation of parameters as meaningful performance data.

The measurands are fluctuating quantities. However, their average values are of main interest for the determination of the main hydraulic performances of a model.

Whatever the quantity to be measured, particular care shall be given to the method of averaging a fluctuating signal to obtain the true mean value of the physical quantity and to the analysis of this signal to characterize the frequency and amplitude of the fluctuations.

For terminology, see 3.2.

6.1.2 General requirements

The output from the data acquisition and data processing system shall be a true reflection of the measurand.

Documented calibration procedures shall exist for all instruments in use. Maintained records of all measurement standards and measuring equipment used to establish compliance to specified requirements shall also exist.

Where applicable, it should be made possible via parallel connections to witness *in situ* the calibration of all instruments in the measuring chain by a primary method to verify that the complete data acquisition system represents the measurand within the specified limits. This usually means that the same signal path, hardware and software configuration shall be used during both calibration and performance testing.

During a performance test, the averages of each of the measured quantities shall be obtained by measurements performed during the same time interval.

A possible check of the complete measuring chain would be to have parallel instrumentation. It is also preferable to have the capability of comparing the results from the data acquisition system and the reference instrument(s) even under running conditions of the machinery being tested.

6.1.3 Data acquisition

6.1.3.1 General

The data acquisition system may be arranged in different ways (including manual methods) depending on the hardware available and the chosen averaging method.

Possible arrangements and examples of different data acquisition systems are given. Usually a combination of different systems is used.

6.1.3.2 Time multiplexing system

In a time multiplexing system (Figure 14), the measurands are measured via multiplexers that scan the channels sequentially a number of times during a given time period.

The calculated average value of the measurand is taken for further processing.

6.1.3.3 Parallel measuring system

In a parallel operated system (Figure 15), the measurands are measured by a computer collecting the data directly from each channel. This arrangement makes possible high-speed data logging and simultaneous sampling of all the channels (see 6.1.4.5).

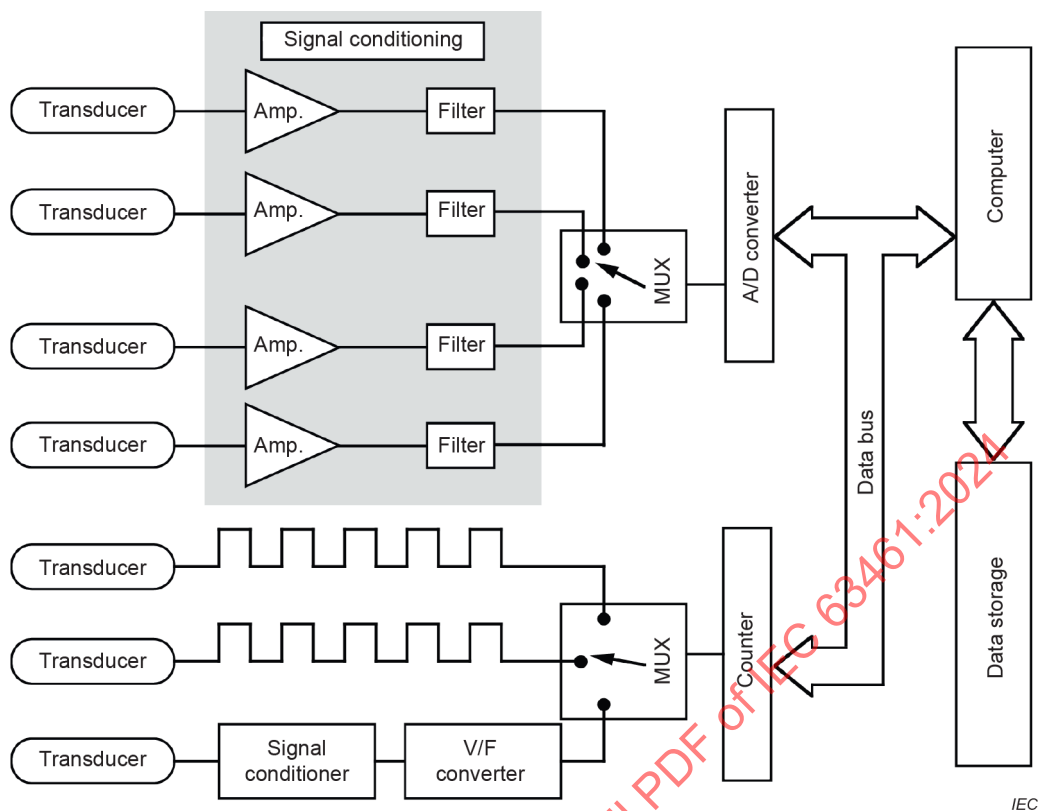


Figure 14 – Time multiplexing data acquisition system

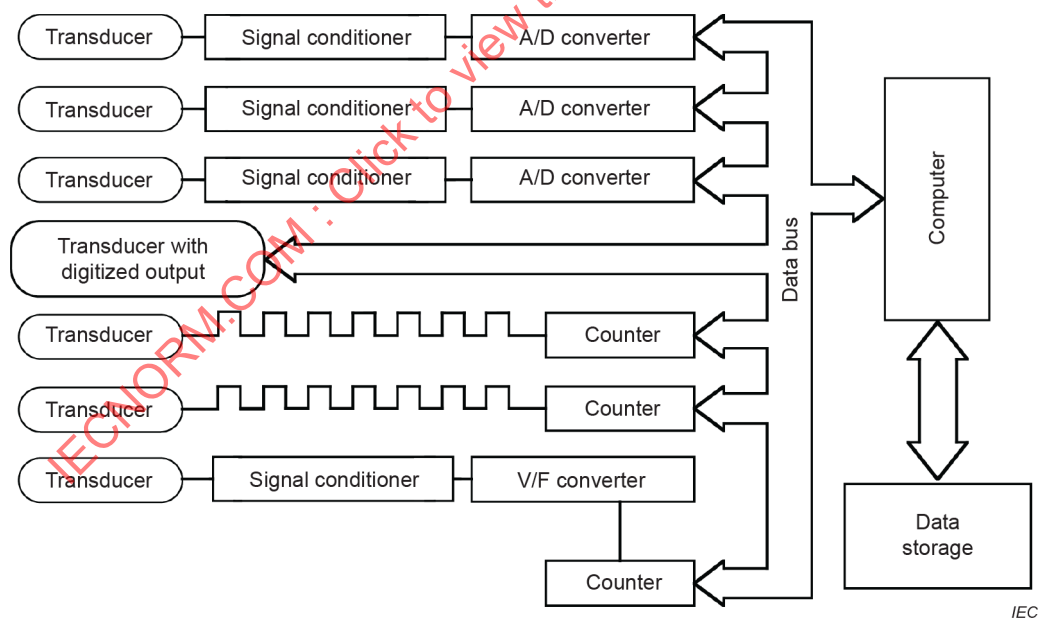


Figure 15 – Bus operated data acquisition system

6.1.4 Component requirements

6.1.4.1 General

The components in the measuring chain shall be able to manage the frequency range of interest.

Components transferring information about the measurand to the transducer, for example pressure lines, can cause spurious effects and cause errors in the measurements.

For all the components in the measuring chain, note that temperature variations, in their environment, can cause errors in the measurements outside the specified limits.

Properties such as linearity and hysteresis shall be documented during calibration.

6.1.4.2 Transducer

Transducers used for the measurement of performance parameters should operate in a stable temperature environment. They should be located where they are not influenced by temperature variations, for example from direct sunlight, heating panels, ventilation channels, etc.

The dynamic behaviour of the measurands shall be known, as the transducers shall only be used in the frequency domain they are designed for.

Care should be taken when using transducers with special inherent damping property or adjustable response time, and transducers with extremely high deflection of the sensing element. Such transducers can cause erroneous measurements in both averaging and oscillating measurements.

6.1.4.3 Cables and termination

The signal path between transducers and amplifier shall be designed in such a way that external influences on the signals (e.g. from power lines or temperature variations) are minimized. Proper shielding and grounding shall be observed. Connectors and terminations shall have stable, reliable mechanical and electrical properties.

Even if all the above precautions have been taken, additionally be aware of spurious influences from the power network on the measurement results.

6.1.4.4 Signal conditioning

6.1.4.4.1 Amplifier

To exploit the resolution of the A/D converter, the output range of the amplifier shall match the input range of the converter.

The amplifier shall be located as close as possible to the transducer to minimize the influence of noise pick-up in the cabling.

The output from transducers with analogue output are often amplified and filtered in a signal-conditioning unit.

6.1.4.4.2 Filter

When choosing filters, special attention should be paid to properties such as:

- AC signals: cut-off frequency, attenuation (order) and time delay;
- DC signals: offset, temperature drift and linearity.

In analyses where simultaneous measurement of two or more measurands is important, be aware of delays in the conditioning and data acquisition systems. Filters cause delays (phase shift) that are a function of the filter type and the cut-off frequency (Figure 16).

The cut-off frequency of a low-pass filter shall be a maximum of half the sampling frequency in order to avoid aliasing effects. This is illustrated in Figure 17. In practice, however, a cut-off frequency of one-third or less of the sampling rate is used.

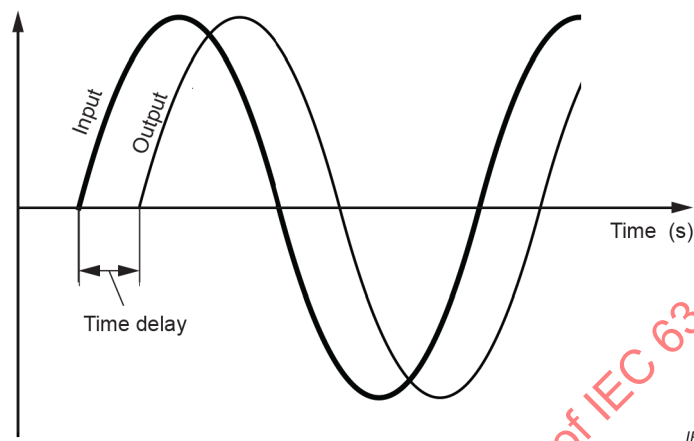
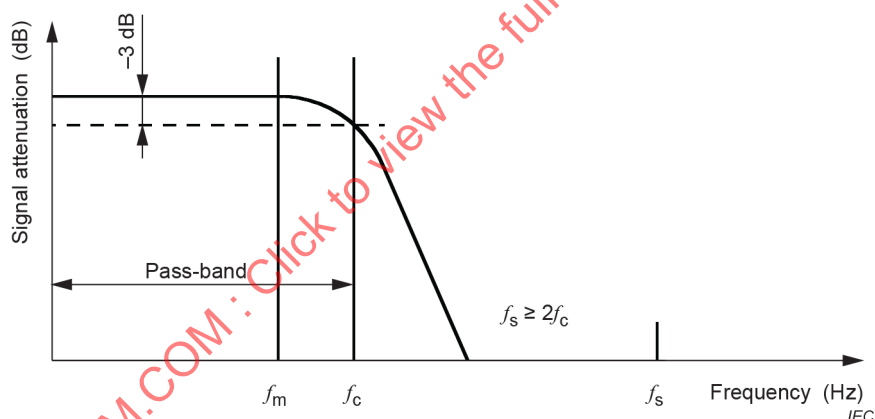


Figure 16 – Time delay



Key

f_m Maximum frequency component of interest

f_c Cut-off frequency of low pass filter

f_s Sampling frequency

Figure 17 – Typical low-pass filter attenuation characteristics

6.1.4.5 Multiplexer

The effective switching rate for the multiplexer shall be compared to the requirements for each measurand. Because the A/D converter is sampling several channels sequentially, the sampling rate for each channel is reduced in proportion to the number of channels.

The switching system is mostly either of a relay or a solid state switching type. Relay switching is usually more accurate than the solid state switching, but has a lower switching rate. When switching between different voltage levels, be aware of interference effects between neighbouring channels. Generally, these errors increase with the switching rate.

6.1.4.6 Analogue-to-digital converter

Before the continuous analogue signal can be read by the computer, the signals shall be digitised.

Important parameters for analogue-to-digital converters are the conversion time, resolution, accuracy, input range, temperature drift and linearity.

The resolution of an A/D converter is defined as the number of bits the converter uses to describe the analogue signal. A 3-bit converter divides the range into $2^3 - 1 = 7$ divisions.

For performance tests, a minimum requirement would be a 14-bit resolution. For dynamic measurements, a lower resolution can be accepted.

To obtain simultaneous measurements during A/D conversion, one A/D converter per channel or a simultaneous sample-and-hold equipment can be used.

6.1.4.7 Computer

The controller in the data acquisition system is the computer. It shall have the following function to configure and synchronize the data logger, handle data transfer, communicate with peripheral equipment, perform calculations and present results.

The computer interface should have a selectable data transfer rate (baud rate) enabling it to communicate with and control different devices on the bus.

6.1.4.8 Data processing

Typical software tasks are:

- control of the data acquisition system;
- calculation of calibration coefficients;
- conversion of electrical values into engineering units;
- calculation of average values and other statistics;
- calculation of data;
- evaluation of uncertainty due to random errors;
- presentation of results;
- data storage.

The raw data for each parameter in an acceptance performance test shall be available after the evaluation of a test point in order to perform a manual calculation and verify the computer code.

If possible, essential performance data should be continuously displayed during the test to give an overview of model performance together with the hydraulic system to which it is connected.

The number of samples and the sampling rate shall reflect the characteristics of the complete measuring chain to give:

- an accurate mean value for performance measurements;
- a satisfactory determination of the necessary characteristics of oscillating measurements.

6.1.5 Check of the data acquisition system

6.1.5.1 General

Each measuring chain shall have a complete schematic diagram showing its main components. This will help the parties to decide where checks should be made when particular problems occur, or when oscillating signals need to be more closely investigated. Figure 18 shows some typical measurement chains with suggested test and checkpoints.

6.1.5.2 Transducer with analogue output

In Figure 18, point 1 is a test point for determining the dynamic behaviour of the measurand.

Proper operation of the signal conditioning system can be confirmed by correlating signals at input point A to test point 3.

Proper amplifier operation can be confirmed by correlating signals at input point A to test point 2.

Proper filter operation can be confirmed by correlating signals at input point B to test point 3.

To check the proper operation of the multiplexer and A/D converter, a reference signal can be applied to point C, and compared with the output at point 5.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

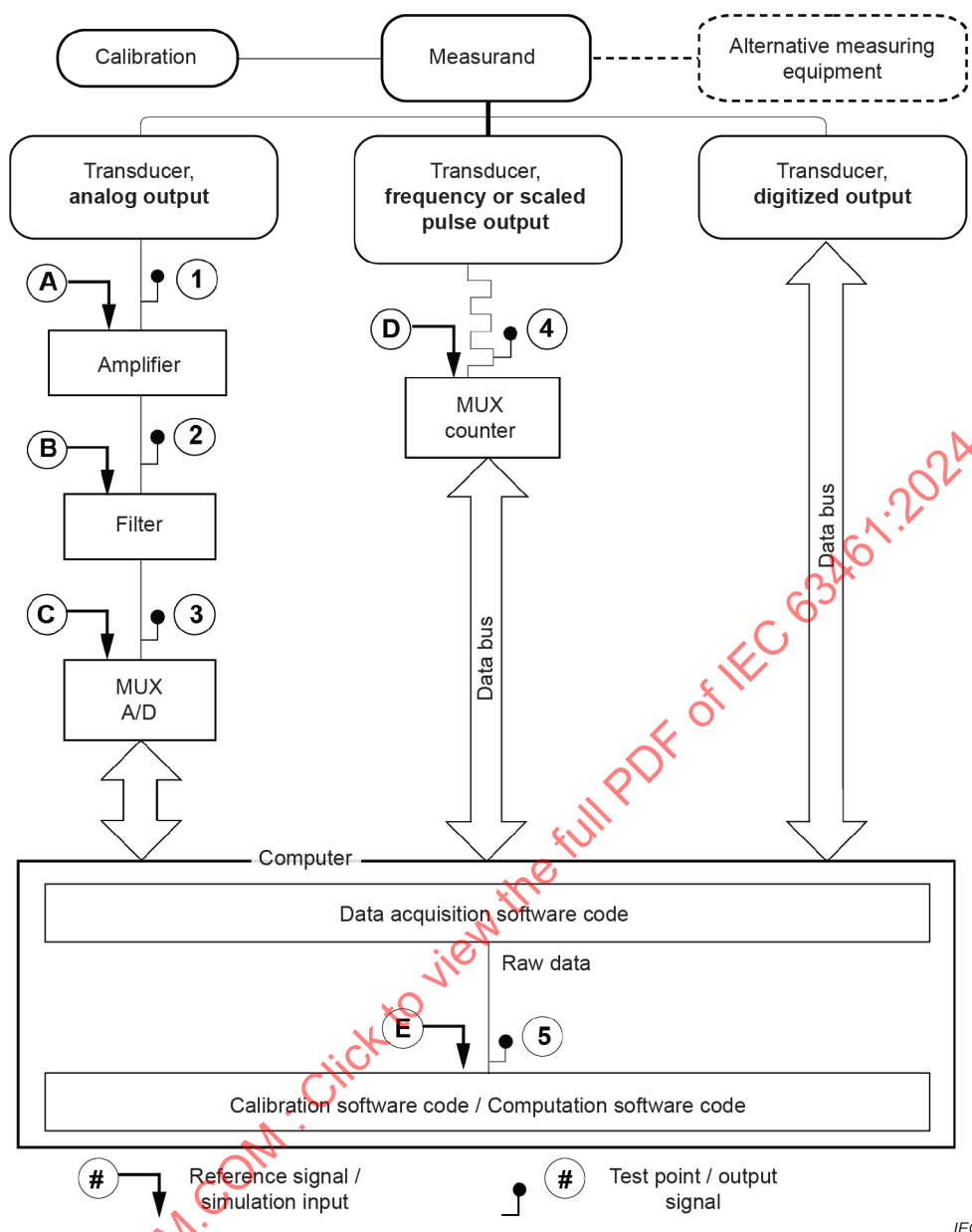


Figure 18 – Different measurement chains and their recommended checkpoints

6.1.5.3 Transducer with frequency or scaled pulse output

The signal quality shall be controlled at point 4 to ensure proper triggering of the counter. A reference signal can be applied at point D to check the timebase of the counter.

6.1.5.4 Transducer with digitized output

The transducer and a measurement chain of this kind can best be checked during calibration.

6.1.5.5 Check for bias effects

To check that the signal conditioning system does not give any bias effects, the output signal from the system may be correlated with the input signal. The latter could be a reference signal from a separate electrical source. The checkpoints are indicated in Figure 18 at point A and point 3.

6.1.5.6 Software code

The software code for data acquisition and processing can be verified by using the raw data read at control point 5, manually checking the calculations and then comparing these results with the results from the software code.

The performance algorithm can be verified by entering numerical values at point E giving a known performance result.

It should be documented that the algorithms used for the calibration of a measuring chain are equivalent to those used in the performance computation.

6.2 Data acquisition and processing for measurement of fluctuating quantities

6.2.1 General

Subclause 6.1 describes the measurement of average values of the main hydraulic performance quantities. Many of the methods used allow recording of the fluctuating component of the quantity as well.

This subclause describes requirements for data acquisition and processing for the determination of the fluctuating quantities. Data processing includes the calculation, evaluation and presentation of statistical quantities representing the model measurements.

The procedure for measurement, data acquisition and data processing shall be agreed upon prior to the tests.

The measured quantities will be:

- a) either of periodic nature;
- b) or of non-periodic, stochastic and intermittent nature.

The fluctuating quantities can be measured:

- c) with their mean components (measurement of $\bar{X}$ in Figure 5);
- d) or as fluctuating component only (measurement of $\tilde{X}$ in Figure 5).

The measurement methods shall be able to record fluctuating quantities in sufficient resolution to describe their characteristic occurrence. Measurements can be made using:

- e) pressure transducers;
- f) accelerometers;
- g) strain gauges;
- h) other transducers for mechanical quantities.

To allow further data analysis, the measurement chain from transducer to data storage system shall fulfil various criteria provided by the signal analysis theory (see reference [16]). In particular, the criteria described in 6.1 shall be applied. However, the fluctuating nature of the quantities considered in this subclause leads to additional requirements described in 6.2.2.

6.2.2 Data acquisition

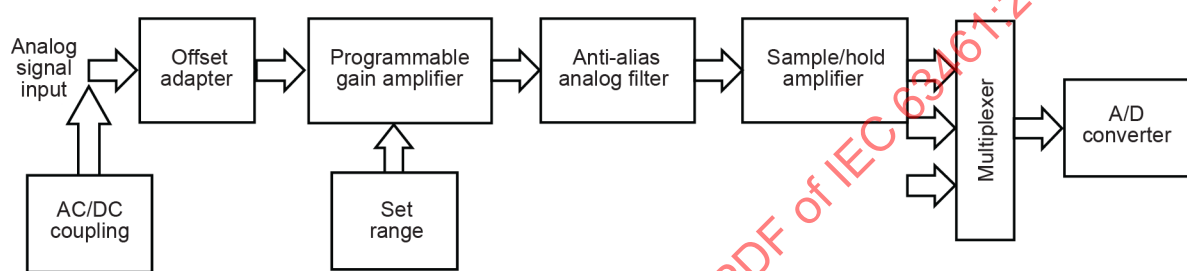
6.2.2.1 Signal conditioning

The purpose of measurement and the methods of data acquisition and processing determine the appropriate signal conditioning. The main purposes of conditioning are:

- removal of high-frequency noise to prevent aliasing effects (analogue filter);
- elimination of irrelevant signal components (analogue, digital filter, or software methods);
- offset adaptation.

6.2.2.2 Analogue-to-digital conversion

Most data acquisition systems are based on periodic sampling followed by analogue to digital conversion. Figure 19 shows a typical data acquisition system.



IEC

Figure 19 – Typical data acquisition system

When the steady-state value of a signal is not relevant and is greater than the peak-to-peak value, offset adaptation can improve the quality of the stored fluctuating component of the signal. AC coupling of the converter inputs can induce signal distortions in the low frequencies. Selectable DC offset adds a constant to the analogue signal. The signal range can be centered on the converter range without low frequency distortions.

Programmable gain amplifiers adapt the analogue signal range to the dynamic range of the A/D converter.

Analogue anti-alias low-pass filters shall be used for periodic sampling. The sampling frequency is limited by the filter characteristics. Simultaneous sampling of all signals can be done with a sample and hold amplifier on each measurement channel. Sampled signals can then be multiplexed and converted sequentially. If the signals are sampled sequentially, the resulting delay shall be considered (see 6.2.2.5).

Most analogue-to-digital converters used in signal analysis deliver a stream of integer values corresponding to discrete increments of the physical input. This operation induces an irreversible loss of data and shall be done with care.

The resolution and precision of an analogue-to-digital converter determine its quality. The resolution is normally stated in bits. The sign bit is not always counted.

The quality of the digitized signal also depends on the matching between the analogue signal extreme values and the converter range. Therefore, each measurement channel shall be conditioned so that the signal best fits the converter range.

6.2.2.3 Sampling rate

To prevent aliasing, an analogue low-pass filter shall be used before sampling. If the filter has a flat gain function up to $f_{\max}$, the required sampling frequency is:

$$f_s > 2f_{\max} + f_{\text{trans}}$$

where f_{trans} is the transition frequency bandwidth (see Figure 20), which depends on:

- the type and order of the analogue anti-aliasing filter;
- the filter cut-off frequency;
- the characteristics of the analogue-to-digital converter;
- the possible high frequency content of the signal to be measured;
- the acceptable noise level.

If these conditions are not fulfilled, aliasing effects will introduce an irreversible corruption of the sampled signal.

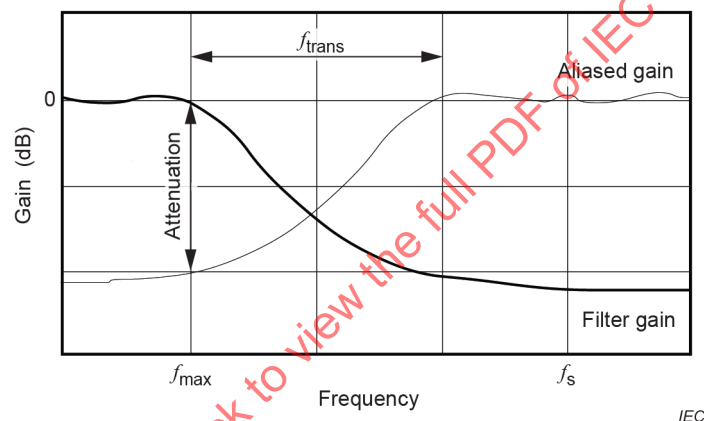


Figure 20 – Frequency response of analogue anti-aliasing filter

6.2.2.4 Duration of signal record and frequency resolution

Detailed definitions of fluctuating quantities can be found in 3.4.11.

It is important to record and store a long enough signal record using a sufficient number of analysis windows for a repeatable estimation of the spectral characteristics of the signal. The signal recording time shall fulfil at least the condition $t_r/t_w \geq 5$, and, unless otherwise agreed upon, shall not be less than 10 s, i.e. $t_r \geq 10$.

The frequency resolution Δf of a discrete power spectrum is related to the analysis time window t_w by the following relation:

$$\Delta f = \frac{1}{t_w}$$

In practice, the window time length shall fulfil at least the condition $n \times t_w \geq 50$ in order to achieve a frequency resolution better than 2 % of the rotating frequency.

The overlap of time windows for frequency spectra estimation shall not be less than 50 %.

6.2.2.5 Phase information

In some cases, the phase relationship between different fluctuating quantities is important. In such cases, the information on phase shift shall be carefully dealt with to prevent possible phase distortions caused by the data processing system.

When the measurement channels have different signal conditioning electronics and the phase is important, this influence shall be determined and corrected.

If the channels are sampled sequentially, the phase distortion $\Delta\varphi$ for channel i ($i = 1, 2, \dots, n$) compared to channel 0 depends on:

- the time Δt between sampling of consecutive channels;
- the position of channel i ;
- the frequency of interest f .

The phase distortion is:

$$\Delta\varphi = 2\pi \times \Delta t \times i \times f$$

where,

Δt can be constant or equal to $1/(n \times f_s)$.

6.2.2.6 Data storage

Both analogue recorders and digital media can be used for data storage. In the first case, raw signals are for example recorded on magnetic tapes and can be recovered for visualization and further analysis. The magnetic recorder is considered as part of the acquisition system and its frequency response should match acquisition criteria. In the second case, digitized data are stored in mass storage media such as disks, tapes, etc.

6.2.2.7 Data acquisition procedure

The following information should be available in order to identify the data acquisition procedure:

- resolution of the analogue to digital conversion in terms of number of bits;
- sampling frequency;
- frequency response of anti-aliasing filters;
- frequency responses of the measurement chain;
- number of windows and the number of samples in each window;
- data storage procedure.

6.2.3 Data processing

Once data acquisition criteria are fulfilled, data processing is performed in order to extract information of interest. A variety of transformations can be applied to time-history signals in order to analyse:

- a) their statistical behaviour;
- b) their spectral content (in the frequency domain);
- c) correlation or other relationships between signals.

Time domain analysis parameters are (see 3.4.11):

- averaged values;
- characteristic peak-to-peak values, standard deviations, RMS values;

- probability density functions, probability distributions;
- others.

The general use of a 97 % confidence level is recommended to ensure mutually comparable results.

Frequency domain analysis parameters are:

- amplitude spectrum (square root of auto power spectrum);
- auto power spectrum (energy spectrum for finite energy signals);
- cross power spectrum;
- transfer functions;
- coherence functions;
- others.

6.3 Error analysis

6.3.1 Definitions

6.3.1.1 Definition of the error

The error in the measurement of a quantity is the difference between that measurement and the true value of the quantity.

No measurement of a physical quantity is free from uncertainties arising from systematic and random errors.

Systematic errors cannot be reduced by repeating measurements since they arise from the characteristics of the measuring apparatus, the installation and the operating conditions. However, random errors can be reduced by repetition of measurements since the random error of the mean of n independent measurements is $\sqrt{n}$ times smaller than the random error of an individual measurement (see Annex H).

6.3.1.2 Definition of uncertainty

The range within which the true value of a measured quantity can be expected to lie, with a suitably high probability, is termed the uncertainty in the measurement. For the purpose of this document, the probability to be used shall be 95 % confidence level.

The uncertainty in the measurement of a quantity X may be expressed as an absolute value e_X or as a relative value: $f_X = e_X / X$.

6.3.1.3 Types of errors

6.3.1.3.1 General

Three types of error shall be considered:

- spurious errors (see 6.3.1.3.2);
- random errors (see 6.3.1.3.3);
- systematic errors (see 6.3.1.3.4).

6.3.1.3.2 Spurious errors

These are errors such as human errors, or instrument malfunction, which invalidate a measurement. For example, the transposing of numbers in recording data or the presence of pockets of air in leads from a water line to a manometer. Such errors should not be incorporated into any statistical analysis and the corresponding measurement shall be discarded. Where the error is not large enough to make the result obviously invalid, the point shall be repeated or some rejection criteria may be applied to decide whether the data point should be rejected (see for example [15]).

6.3.1.3.3 Random errors and associated uncertainty

Random errors are caused by numerous, small, independent influences that prevent a measurement system from delivering the same reading (repeatability of the measurement system) when supplied with the same input value of the quantity to be measured. The measurements deviate from their mean in accordance with the laws of chance, such that their distribution usually approaches a normal (gaussian) distribution as the number of measurements is increased.

The random error is influenced by the care taken during the measurements, the number of measurements and the operation conditions. The scatter of the readings observed during a test results from the combination of the random error arising from the instrumentation and of the influence of the operating conditions. The repetition of points at a given operating condition enables the value of the uncertainty associated with random errors to be established by statistical methods (see 6.3.2.3.1 and Annex H).

When the sample size (i.e. the number of measurements) is small, it is necessary to correct the statistical results that are based on the assumption of a normal distribution, by means of the Student's t value, as explained in Annex H. Student's t is a factor which compensates for the uncertainty in the standard deviation increasing, for a given confidence level, as the sample size is reduced.

6.3.1.3.4 Systematic errors and associated uncertainty

A systematic error is one that invariably has the same magnitude and the same sign under the same conditions of measurement. Therefore, it cannot be reduced by increasing the number of measurements if the equipment and conditions of measurements remain unchanged.

Systematic errors do not affect the repeatability of measurements during a test.

The uncertainty associated with systematic errors cannot be assessed experimentally without changing the equipment or conditions of measurements. The only way to verify the main measuring system and to obtain an order of magnitude of the systematic error is to measure each basic quantity by two different systems, if they are available.

The alternative is to make a subjective judgement on the basis of experience and consideration of the equipment involved.

If the error has a unique known value then this should be added to (or subtracted from) the result of the measurement and there is no longer systematic error in the measurement due to this source.

If the systematic error of a measuring device is unknown but its error limits (class of accuracy) are specified, the interval between them may be assumed as the uncertainty due to the systematic errors of that device with a confidence level better than 95 %.

Notwithstanding the difference shown above between systematic and random errors, the probability distribution of the uncertainty values of each systematic component is essentially

gaussian and the accepted convention calculating the total uncertainty due to systematic errors f_s from the individual systematic errors is the root-sum-square method.

6.3.1.4 Total uncertainty

The total uncertainty in a measurement (f_t) is obtained by combining the uncertainties due to systematic (f_s) and random (f_r) errors (see 6.3.1.3.4 and 6.3.1.3.3). It defines a range within which the true value is assumed to lie with a probability of 95 % and any point in this range is equally valid.

Given the same type of probability distribution of the uncertainty due to systematic and random errors, they can be combined by the root-sum-squares method. Subclause 6.3.2.3.4 explains how to determine the total uncertainty in model tests.

6.3.2 Determination of uncertainties in model tests

6.3.2.1 General

Starting from the measurements made on the model, the different sources of error shall be examined to determine the corresponding uncertainties.

Table 4 provides a summary of the most important sources of error that can occur during model tests.

Clause F.2 gives an example of analysis of the sources of error and of uncertainty evaluation when measuring a quantity by a secondary electronic device.

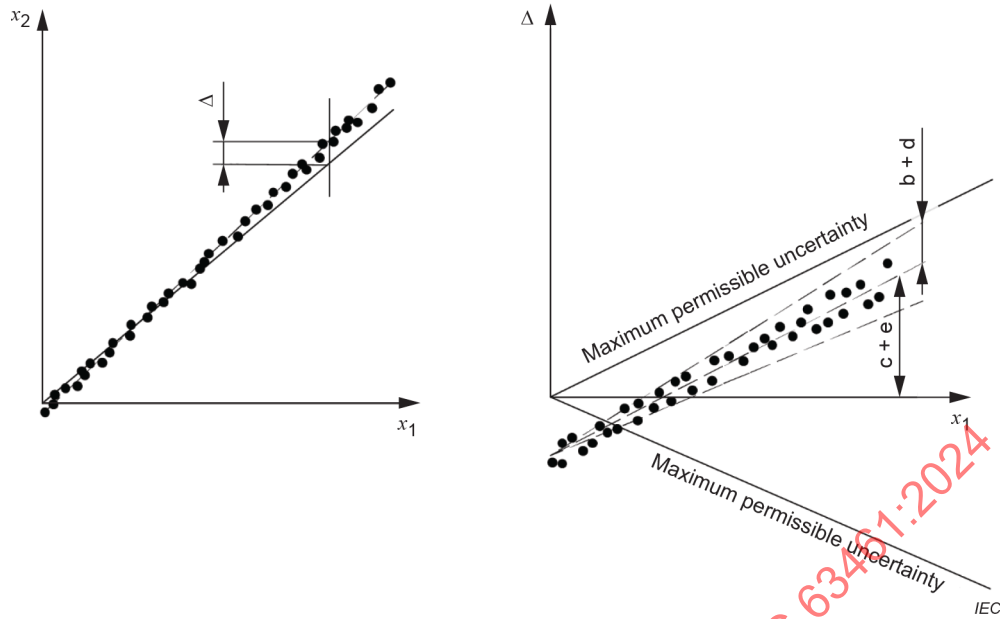
6.3.2.2 Sources of errors

6.3.2.2.1 Errors arising during the calibration of a secondary instrument

Besides possible spurious errors which should be eliminated, systematic and random errors may occur during the calibration of a secondary measuring instrument. The bias⁴ of the primary method and of the secondary instrument and the errors in physical properties are systematic errors, whereas the repeatability of the primary method and of the secondary instrument are random errors; the errors due to physical phenomena and influence quantities may be of partly systematic and partly random nature.

The total uncertainty in the calibration of the secondary instrument may be calculated by combining, by the root-sum-square method, the error components (see Table 4 and F.2), as far as each of them can be evaluated. In practice, a calibration result represented by the example shown in Figure 21 may be used to estimate the value of errors items b) to e) of Table 4. Item f) is generally negligible, item a) (bias of the primary method) should be obtained from a higher level in the calibration chain (traceability of the primary method) or certified by a neutral authority.

⁴ The bias error is the systematic component of the error of a measuring instrument.



Key

x_1 Values given by the primary method

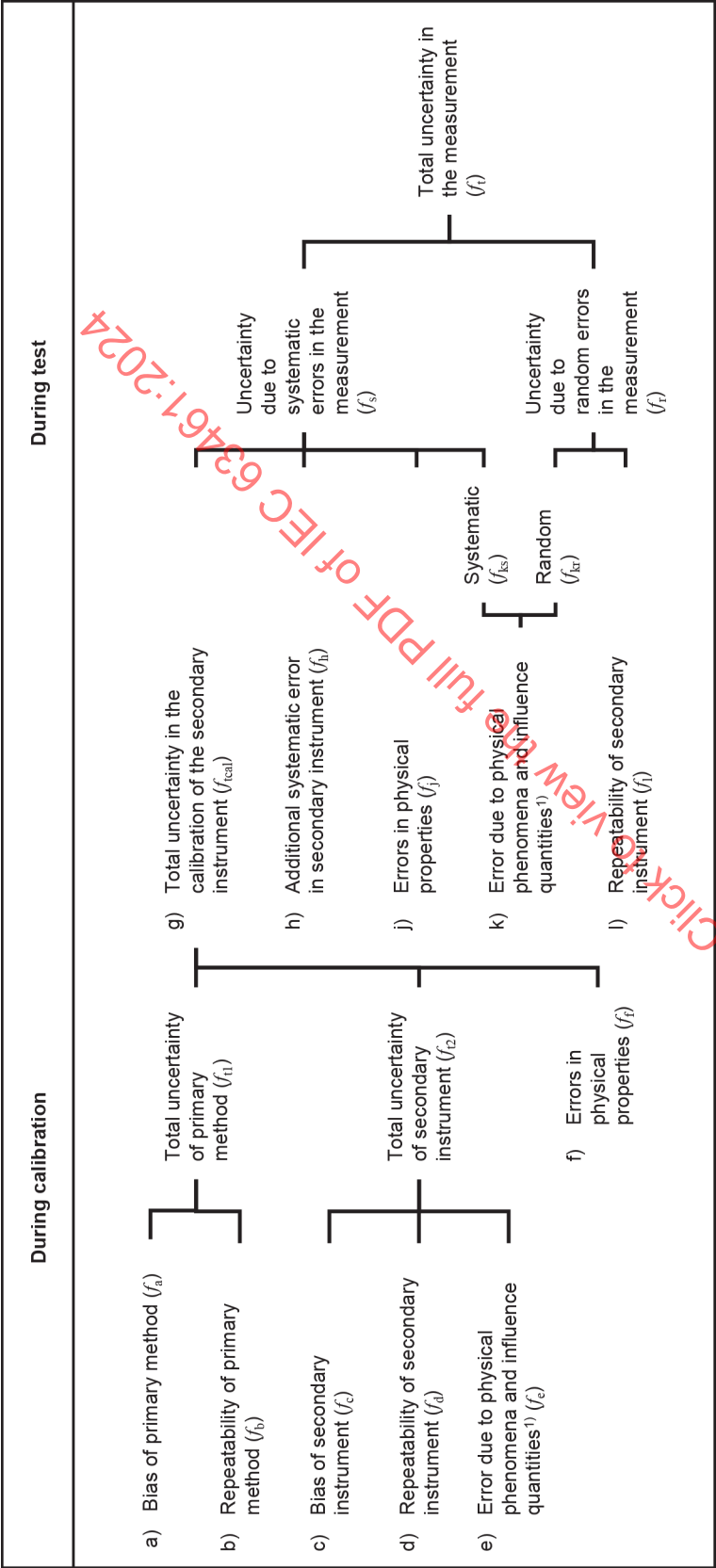
x_2 Readings of secondary instrument

• Measured points

Δ Difference between the calibration curve defined by x_1 and the measured point b), c), d), e): See Table 10.

Figure 21 – Example of calibration curve

Table 4 – Summary of errors that determine total measurement uncertainty



Items a) to f) are cross-referenced with F.2.2.1; items g) to l) are cross-referenced with F.2.3.1.

¹⁾ Influence quantity: a quantity that is not the subject of the measurement but that affects the result of the measurement.

6.3.2.2.2 Errors arising during the tests

Whatever the nature of its individual components, the total error in the calibration (item g)) described in Table 4 becomes a systematic error in the measured quantity when this calibration is used for subsequent model tests.

The errors due to physical phenomena and influence quantities occurring during the tests (item k) of Table 4) may be neglected if the conditions of measurement (ambient temperature, voltage and frequency of the power supply, flow pattern, etc.) are maintained within a reasonable range during calibration and tests.

Since error in the determination of physical properties (item j) of Table 4) is generally small, the systematic error is largely controlled by the choice of the calibration method, the characteristics of the measuring apparatus, the installation and the operating conditions. For example, the value of the kinetic energy calculated with the mean velocity differs from its true value if the velocity distribution at the measuring section is not uniform (see 8.2.2.4).

The repeatability of the secondary instrument appears once again during the tests (item l) of Table 4) and results in a random error, which may be characterized as stated in 6.3.2.3.1.

6.3.2.3 Estimation of the uncertainty

6.3.2.3.1 Uncertainty associated with random errors

An agreement between the parties prior to the test should specify the maximum permissible value of the uncertainty due to random errors, f_r , for each quantity subject to guarantee. In the absence of such an agreement, the maximum permissible value of the uncertainty due to random errors in the hydraulic efficiency near the optimum should be $(f_{\eta_h})_r = \pm 0,1 \%$.

The actual value of the uncertainty due to random errors shall be estimated during the test at some operating points in a range in which the model runs in stable conditions (e.g. in the range near the point of maximum efficiency). For each of these points, the measurements shall be repeated a sufficient number of times (e.g. at least five) for applying the procedure described in Annex H.

If, in these check points, the observed uncertainty due to random errors is lower than the previously agreed values, the maximum permissible levels of the uncertainty are deemed satisfied in the whole guaranteed operating range, even if the direct evaluation of the uncertainty in operating points with disturbed conditions gives higher values than the agreed value. In disturbed operating conditions (for instance a Francis turbine operating at partial load), the scatter of the measurements may be greatly increased; these higher values may nevertheless be accepted, for they arise from the model and not from the instrumentation.

If, in the check points, more than 5 % of the results are outside the agreed range, an accurate analysis of the conditions of measurement shall be made and the measurements shall be repeated or a new uncertainty bandwidth value due to the random errors agreed.

6.3.2.3.2 Uncertainty associated with systematic errors

The first step in estimation of this uncertainty is to identify each component which can influence its value. The second step is to allocate uncertainty limits to allow for each of these components. This can be done, in part at least, by statistical analysis.

The systematic error of a measurement is given mainly by the systematic error due to the calibration of the secondary instrument, and by the errors in physical properties.

The following considerations are useful in evaluating the uncertainty due to systematic errors (see Table 4 and Annex F):

- a) As explained in 6.3.2.2.2, almost all the sources of systematic errors are covered by the calibration of the secondary instrument. In most cases, the uncertainty due to systematic errors in the measurement of a quantity may be taken as equal to the total uncertainty in the calibration of the secondary instrument used for the test $f_s \cong f_{\text{tcal}}$, but it shall be borne in mind that in some circumstances other sources of error can be taken into account.
- b) According to the measuring method and instrument used, the uncertainty due to systematic errors consists of some of the following components:
 - the total uncertainty f_{t1} proper to the primary method shall be established before the calibration (see 6.3.2.2.1);
 - the uncertainty f_d due to the random error of the secondary instrument during a calibration and to the scatter of several calibrations carried out at various periods if no systematic trend appears. For instance, if the calibration coefficient used during the test results from the average of n calibrations characterized by a standard deviation s_c , this component of the uncertainty may be taken as equal to:

$$f_d = \pm \frac{ts_c}{\sqrt{n}}$$

where t is the Student's coefficient for $(n - 1)$ degrees of freedom (see Table H.2);

- the bias of the secondary instrument and the uncertainty due to the effect of physical phenomena and influence quantities are covered by the calibration, and the residual uncertainty in the applied correction can generally be omitted;
 - the errors in physical properties, if any, are small; for instance, the uncertainty f_p in the determination of water density is lower than $\pm 0,05 \%$;
 - an additional uncertainty can arise from the regression process used to determine the calibration curve. Although this uncertainty can be evaluated in accordance with ISO TR 7066 (all parts), a conventional value of say $\pm 0,05 \%$ may be assumed.
- c) The uncertainty f_s due to systematic error in a measurement can then be obtained by combining the component uncertainties by the root-sum-square method. This value applies when the measurements are made in normal conditions by experienced personnel with apparatus of high quality, in accordance with the provisions of this document, and can be used as a guide to establish the value of uncertainty due to systematic errors.

6.3.2.3.3 Uncertainty in a derived quantity

Prior to the test, an agreement between the parties shall specify the bandwidth of the systematic component of uncertainty for the different quantities, including the hydraulic efficiency. The actual values of uncertainty due to systematic errors, like those resulting from random errors, depend on many factors, some of which can only be evaluated after completion of the test. A review of these factors shall be made and agreement established as to whether the expected uncertainties have to be changed on technical grounds or not.

The uncertainty (relating to either systematic or random errors) of a derived quantity is determined by combining the uncertainties of the component measurements by the root-sum-square method.

For example, the uncertainty in the calculation of hydraulic efficiency $(f_{\eta_h})_s$ due to systematic errors is computed from the individual systematic error components of the uncertainty in the discharge $(f_Q)_s$, specific hydraulic energy $(f_E)_s$, torque $(f_T)_s$, speed of rotation $(f_n)_s$ and density of water $(f_\rho)_s$ ⁵ measurements/calculations by:

$$(f_{\eta_h})_s = \pm \sqrt{(f_Q)_s^2 + (f_E)_s^2 + (f_T)_s^2 + (f_n)_s^2 + (f_\rho)_s^2} \quad (\text{see Annex F})$$

For contractual purposes it is conventionally accepted to omit the uncertainty associated with the transposition formula of the hydraulic efficiency.

6.3.2.3.4 Total uncertainty

The total uncertainty (see Table 4) in any quantity is given by:

$$f_t = \pm \sqrt{f_s^2 + f_r^2}$$

When the random component of uncertainty (evaluated as required in 6.3.2.3.1) is lower than or equal to the maximum permissible value (generally $\pm 0,1 \%$), it is assumed to be conventionally equal to this value, which shall then be used to calculate the total uncertainty.

When, in some operating points, the conditions of measurement are disturbed and the scatter of the readings (see 6.3.2.3.1) results in an increase of the observed uncertainty due to random errors, it is reasonable to take into account the observed value instead of the previously agreed one for calculating the total uncertainty.

7 Methods of measurement

7.1 Discharge measurement

7.1.1 General

As far as possible, there should be no loss or gain of water between the machine and the discharge measuring device. Nevertheless, if such auxiliary discharges exist, they shall be measured independently.

The methods which may be used for measuring the discharge during a model acceptance test can be classified into primary and secondary methods.

⁵ The systematic component of the uncertainty in the measurement of the density of water $(f_\rho)_s$ may generally be neglected.

7.1.2 Choice of the method of measurement

7.1.2.1 Primary methods

Primary methods are those which need only measurements of fundamental quantities: length, mass and time. In the field of application of this document, the primary methods which may be used are:

- the weighing method (see 7.1.4.1);
- the volumetric method (see 7.1.4.2).

These methods are the most accurate ones. For this reason, and notwithstanding some inherent disadvantages (cumbersome equipment, duration of measurement, etc.), any model test facility shall necessarily include the possibility of using one of these methods; nevertheless, for convenience of use, it is generally supplemented by a secondary method.

7.1.2.2 Secondary methods

Many other methods (see 7.1.5), founded on various principles and thus considered as secondary methods, may be used for discharge measurements in model tests. Although some of them are standardized, the high accuracy required for the purpose of this document makes it mandatory to calibrate the measuring equipment *in situ* under the prevailing test conditions by one of the above primary methods. Consequently, and since repeatability is the most important quality required from the secondary method measuring device, it is not necessary for it to comply with all the requirements of the relevant standards.

The arrangements necessary to carry out such a calibration periodically, without dismantling or modifying the measuring line, shall be provided at the design stage of the test facility.

The main secondary methods of discharge measurement are:

- velocity-area method by means of current-meters or Pitot tubes and tracer methods are very seldom used for model tests, and will not be mentioned in the subclauses that follow;
- thin-plate weirs and differential pressure devices (orifice plates, nozzles and Venturi tubes), even when designed, installed and used in accordance with the relevant ISO standards, do not achieve the accuracy required for model tests, when using standardized discharge coefficients, therefore periodic calibration *in situ* is mandatory;
- various types of flow meters, such as turbine, electromagnetic, acoustic or vortex flow meters; they are particularly convenient to use for they allow quick measurements, their output signal can easily be introduced into a data acquisition system and most of them generate little disturbance in the flow pattern. For the time being, the effect of installation conditions on their response is not established with sufficient accuracy for model tests. Thus, their calibration *in situ* is mandatory and their repeatability over the whole range of flow conditions to be encountered shall be checked regularly.

7.1.3 Accuracy of measurement

7.1.3.1 Reference to ISO standards

A method of measurement is described in detail in the following subclauses only when no standardized procedure exists elsewhere. Whenever possible, reference has been made to existing standards, especially to those published by ISO, which are particularly suited to the precise requirements of this document.

7.1.3.2 Evaluation of uncertainty

The numerical values of measurement uncertainty indicated in the following subclauses are to be used only as guidance. They are valid only:

- with the best conditions for measurement;
- if all requirements specified in this document and in the relevant standards are satisfied;
- if the testing and analysis are carried out by qualified and experienced personnel.

If these conditions are not satisfied, there can be an unpredictable increase in both the systematic and random errors of the discharge measurement.

In each particular case, the actual values of uncertainty due to systematic and random errors shall be evaluated by the user, taking into account the whole measuring system and the operating conditions of the test facility.

The method for combining random and systematic error components to calculate the total uncertainty due to the individual sources of error is explained in 6.3.2.3.4. The final result is then expressed as the uncertainty at a confidence level of approximately 95 %.

7.1.3.3 Steadiness of the flow

Whatever method is used, a discharge measurement for a model acceptance test is valid only if the flow is steady or nearly steady during each point.

In most situations, the primary methods require a rather long measurement time and produce only a mean value of the discharge during this time. Thus, it is possible to ascertain a variation of the flow occurring between two runs, but not the possible fluctuations (see 8.5.3).

Most secondary methods quoted in 7.1.2.2 produce quasi-instantaneous readings that have to be averaged to obtain the mean value of the discharge during the point and which can be treated graphically and statistically to assess the nature and the extent of the fluctuations of the flow (see 6.1 and 6.2). This is another reason why a test facility should have access to a primary and a secondary method.

7.1.4 Primary methods

7.1.4.1 Weighing method

7.1.4.1.1 Principle of the method

ISO 4185 gives all necessary requirements concerning the measuring apparatus, the procedure, the method for calculating the discharge and the errors associated with the measurement.

Although ISO 4185 specifies two alternative methods, the "static" and the "dynamic" method, only the static weighing method, which consists of diverting the flow to the weighing tank for a measured time and then weighing the diverted quantity, is recommended for the purpose of this document.

The weighing method, which gives only the average discharge value during the time taken to collect a suitable quantity of water, may be considered the most accurate method of discharge measurement.

As stated in ISO 4185, the calibration of the weighing device shall be periodically checked; at least every two years for a mechanical weigh-beam and for a load cell. These intervals may be extended if the calibration history shows stable results.

7.1.4.1.2 Uncertainty of measurement

The weighing method is affected by errors relating to weighing, measuring of filling time, determination of density, taking into account the temperature of the fluid and motion of the diverter. Furthermore, a buoyancy correction shall be made to the readings of the weighing machine to account for the difference between the upthrust exerted by the atmosphere on the liquid being weighed and on the reference mass used during the calibration of the weighing device.

If the installation is carefully constructed, maintained and used, an uncertainty due to systematic errors on the discharge measurement (at a confidence level of 95 %) within $\pm 0,1$ % to $\pm 0,2$ % should be achieved.

7.1.4.2 Volumetric method

7.1.4.2.1 Principle of the method

ISO 8316 gives all necessary requirements concerning the measuring apparatus, the procedure, the method for calculating the discharge and the errors associated with the measurements.

Although ISO 8316 specifies two alternative methods, the "static" and the "dynamic" methods, only the static gauging method is recommended in this document.

The volumetric method is approximately of the same accuracy as the weighing method and similarly supplies only the average discharge value during the time taken to collect a suitable quantity of water.

As stated in ISO 8316, the calibration of the volumetric tank shall be periodically checked; at least every five years for concrete tanks and every three years for metallic tanks. These intervals may be extended if the calibration history shows stable results.

7.1.4.2.2 Uncertainty of measurement

The volumetric method is affected by errors relating to the calibration of the reservoir, the measurement of levels, the measurement of filling time and the motion of the diverter. The water tightness of the reservoir shall be checked and a leakage correction applied if necessary.

If the installation is carefully constructed, maintained and operated, an uncertainty due to systematic errors on the discharge measurement (at a confidence level of 95 %) within $\pm 0,1$ % to $\pm 0,2$ % can be achieved.

7.1.5 Secondary methods

7.1.5.1 General requirements

Various types of flowmeter may be used by agreement under the following conditions:

- the device chosen shall be of the best quality available, particularly with respect to its repeatability and its sensitivity to influence quantities (ambient temperature, frequency and voltage of the power supply, etc.);
- the flowmeter and the associated measuring system shall be calibrated by a primary method in the actual operating conditions (see 5.3.2.4 and 7.1.5.7);
- the repeatability of the measurement shall be checked over the whole range of discharge to be measured.

Although their application is not mandatory, the relevant standards and manufacturer's instructions give useful advice concerning the best installation and measurement conditions.

The types of flowmeter most often used are described in 7.1.5.2 to 7.1.5.6.

7.1.5.2 Differential pressure devices

Orifice plates, nozzles or Venturi tubes may be used for discharge measurement in model test facilities, particularly operating on closed circuit without a free water surface.

For the design of the differential pressure device, including its pressure tapings, its installation and operating conditions, refer to ISO 5167-1; however, the standardized discharge coefficients will not achieve the accuracy required in this document (see 7.1.2.2). Other types of differential pressure devices than those described in ISO 5167-1 may also be used.

Differential pressure devices offer high reliability, but are very sensitive to the flow pattern and create a high-pressure loss, particularly orifice plates and nozzles.

The differential pressure generated by the device shall be measured in accordance with 7.2.4.

The connecting lines between the primary device and the pressure gauge shall comply with ISO 2186.

Care should be taken to avoid any cavitation development.

7.1.5.3 Turbine flowmeters

Turbine flowmeters, which generally include a flow straightener, require a minimum upstream and downstream straight length and generate only very slight disturbance of the flow, but create a somewhat high pressure loss. The output signal, which is a frequency measurement, is simple to measure without loss of accuracy. Care shall be taken to maintain the bearings in good condition and to maintain the blades of the turbine clean. The calibration shall be checked at least after each maintenance.

Since cavitation on the runner blades can occur in low-pressure conditions, calibration shall be checked at the lowest test pressure (see 7.1.5.7).

7.1.5.4 Electromagnetic flowmeters

Electromagnetic flowmeters are the subject of ISO 20456:2017.

The main advantages of electromagnetic flowmeters are that they generate neither disturbance of the flow, nor pressure loss, and are not very sensitive to wear. They produce an instantaneous reading of discharge and thus are particularly convenient for observing discharge fluctuations. Care shall be taken to detect any drift in the electronic circuitry output and in the surface condition of the electrodes. The calibration shall be checked at least after each maintenance.

7.1.5.5 Acoustic flowmeters

Several methods of acoustic discharge measurement exist. Currently available knowledge is such that the method preferred for the purpose of this document is that based on the measurement of the transit time of acoustic pulses travelling upstream or downstream, preferably including several parallel paths.

The data acquisition and processing system shall demonstrate that the equipment is operating correctly (separate measurement of the average velocity along each individual path, verification of the speed of sound, checking of the proportion of lost pulses, etc.).

More details on this method are given in IEC 60041:1991.

Other kinds of acoustic flowmeters, based, for instance, on the measurement of the refraction of an acoustic beam by fluid velocity, or on the cross-correlation of acoustic signals emitted in two cross-sections, may also be used.

Acoustic flowmeters have the advantage of not introducing any flow disturbance or pressure loss, but are somewhat sensitive to the velocity distribution and to the presence of gas bubbles and acoustic noise. Their sensitivity to turbulence and limited sampling of local instantaneous velocities do not allow the use of successive readings to assess the level of discharge fluctuations.

7.1.5.6 Vortex flowmeters

The principle of vortex flowmeters is based on measuring the frequency of vortex shedding generated by a bluff body inserted in the flow, the frequency of which is proportional to the mean velocity in a given range of Reynolds numbers.

Although many devices of this type are available, experience with this method of discharge measurement is still limited and the method shall only be used with caution. For instance, any vibration of the pipe is liable to alter the measured frequency and shall thus be avoided.

Due to the risk of cavitation on the bluff body of the vortex flowmeter, the calibration shall be checked at the lowest test pressure (see 7.1.5.7).

7.1.5.7 Calibration procedure

As stated above, any device used for discharge measurement by a secondary method shall be calibrated against one of the primary methods described in 7.1.4. The calibration shall be made without dismantling the flowmeter from the test circuit or modifying the flow conditions at the inlet of the flowmeter.

Calibration shall include the whole of the flowmeter and the associated measuring system: for instance an orifice plate, the connecting pipes, the pressure transducer, its power supply and the data acquisition system.

Normally, calibration should be carried out in the actual operating conditions (pressure, temperature, water quality, etc.) prevailing during the tests. Should the pressure encountered during the tests be lower than the minimum pressure attainable in the open circuit used for calibration, it shall then be demonstrated that the flowmeter calibration is not affected by cavitation at that reduced pressure. This may be achieved by using two secondary flowmeters in series, one of which is not sensitive to cavitation effects. It is not permitted to make a discharge measurement with a flowmeter affected by cavitation, even if calibrated in the same operating conditions, as the phenomena involved are not sufficiently reproducible.

Any calibration shall include sufficient measuring points evenly distributed over the whole range of discharge to be measured during tests, to allow an accurate evaluation of their scattering.

In most cases, the result of a calibration can be written, at least in the range of use, as:

$$Q = CR^{\alpha}$$

where

- R is the output signal delivered by the secondary flowmeter;
- α is an exponent which is known by theoretical considerations ($\alpha = 1$ when R is the frequency of a turbine meter, $\alpha = 1/2$ when R is the differential pressure of a Venturi tube, $\alpha = 3/2$ when R is the head over a rectangular weir, etc.);
- C is a discharge coefficient that can be constant or variable over the range of the meter.

It is thus possible to plot the discharge coefficient versus the discharge indicated by the primary method or preferably versus the corresponding non-dimensional coefficient appropriate to the type of flowmeter (Reynolds number for flowmeters in closed conduit, Froude number for weirs).

In any case, the best fitted curve (often a straight line) through the measured points should be determined by a regression technique such as the least squares method. Guidance for deriving this calibration curve and evaluating the associated uncertainty can be found in the ISO 7066 series (see also Annex E).

The secondary flowmeter should normally be calibrated before and after the test (see 5.3.1.6). It may be agreed that the relative deviation $2(Q_1 - Q_2) / (Q_1 + Q_2)$ between both calibrations shall be less than a permissible value specified prior to the test (for instance 0,1 %), with Q_1 and Q_2 being the readings of the secondary flowmeter delivered before and after the test for the same discharge given by the primary method.

If a significant difference appears between both calibrations, the flowmeter and the associated measuring system shall be carefully inspected to find the reason for this deviation and the test may possibly be rejected. A historical record of the flowmeter calibration should be available for inspection and analysis. If no systematic trends occur, an average of all obtained values can be a better approximation of the true value than the mean of the two values obtained before and after the test.

7.2 Pressure measurement

7.2.1 General

This subclause deals only with the measurement of the time-averaged value of the pressure. Pressure measurements in hydraulic machinery are made in order to determine:

- a) quantities of the hydraulic performance such as specific hydraulic energy E (see 8.2.2 and 8.2.3);
- b) gauge pressures or differential pressures at special locations of the water passage in the model for various purposes: for example to measure the discharge utilizing differential pressure devices (see 7.1.5.2) or to obtain information on:
 - local pressure;
 - pressure distribution;
 - index testing (values to be converted to site conditions).

The pressure p is measured as single gauge pressure or differential pressure at steady-state conditions.

7.2.2 Choice of pressure-measuring section

Special attention shall be paid to the location of the measuring sections; normally they are identical to the reference sections. There should be minimum disturbance of the flow. Normally, the high-pressure and low-pressure reference sections 1 and 2, specified by the contract, should fulfil these conditions. However, under exceptional circumstances where the velocity distribution of the reference section is considerably distorted, this section should be replaced, if possible, by other measuring sections as close as possible to the reference section and offering better flow conditions.

The plane of the measuring section should preferably be normal to the average direction of flow. Its cross-sectional area, which is required for computing the mean water velocity, shall be readily measurable.

The measuring section should preferably be arranged in a straight conduit section but could be slightly convergent or divergent.

7.2.3 Pressure taps and connecting lines

7.2.3.1 Number and location of pressure taps

Generally, for any form of section at least two pairs of opposed pressure taps shall be used (four pressure taps). In the case of circular sections, the four pressure taps shall be arranged on two diameters at right angles to each other. The taps should neither be located at or near the highest point of the measuring section in order to avoid air pockets, nor near the lowest point because of the risk of dirt obstructing the taps.

In the case of non-circular sections (in most cases rectangular sections) the taps should not be located near the corners. If taps are arranged at the top or bottom of a section, special care shall be taken to avoid disturbances due to air or dirt.

If the flow conditions are disturbed or asymmetric, more than four pressure taps shall be used.

Mean pressure measurements at each pressure tap of the same measuring section shall not differ from one another by more than 0,5 % of the specific hydraulic energy of the machine referring to operation close to the best efficiency point.

If this requirement is not fulfilled, mutual agreement should be reached to either:

- select another location; or
- to make an evaluation of the specific kinetic energy distribution in the measuring section according to 8.2.2.4; or
- to accept this deviation, and add arithmetically an additional uncertainty to the measurement uncertainty in the specific hydraulic energy E (see 8.2.2.5 and F.3.4).

7.2.3.2 Design of pressure taps

Pressure taps shall be located in inserts of non-corroding material. Figure 22 shows typical inserts which shall be installed flush with the wall of the conduit.

The cylindrical bore of the pressure tap shall be 2 mm to 4 mm in diameter and have a minimum length ℓ of at least twice the diameter. It shall be perpendicular to the conduit wall and free of all burrs or irregularities which could cause local disturbances. The edges of the openings shall be sharp or rounded with a radius $r \leq d/4$ smoothly joining the flow passage. The purpose of this rounding is to eliminate possible burrs.

The surface of the conduit shall be smooth and not be curved in the flow direction in the vicinity of the bore for at least 100 mm upstream and downstream.

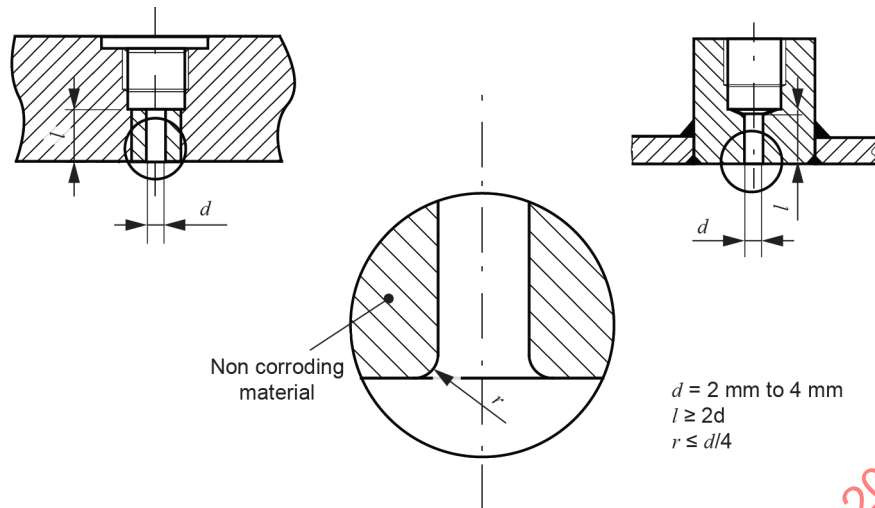
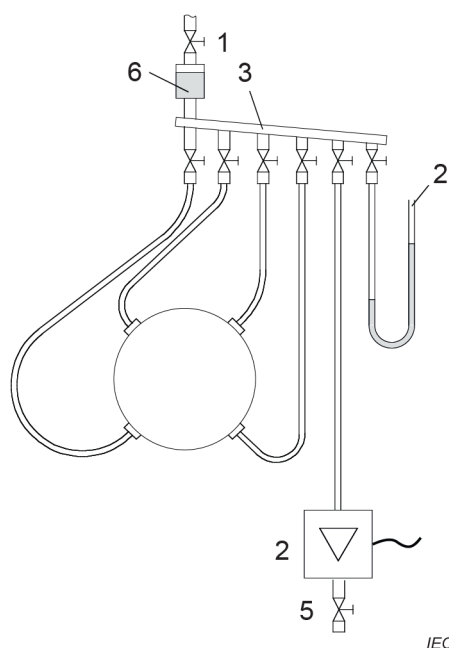


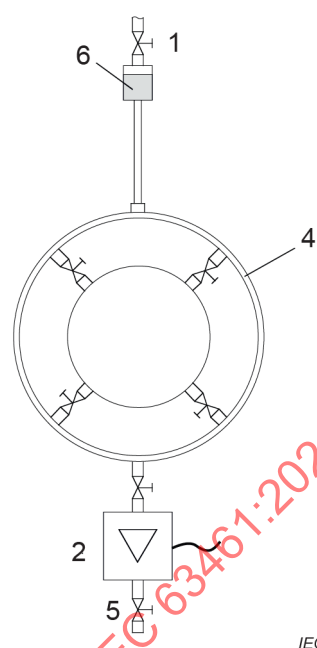
Figure 22 – Examples of pressure taps

7.2.3.3 Pressure lines

Pressure taps may be manifolded (Figure 23), but each tap shall be separately valved so that it can be read individually. The diameter of the connecting lines shall be at least twice that of the tap and not less than 6 mm. The diameter of the manifold (or of the ring manifold, Figure 23 b)) shall be at least three times the diameter of the tap. Connecting lines should, if possible, be of equal length, slope upward to the gauge or manometer with no intermediate high spots where air can be trapped. Valves with a gas-collecting chamber shall be provided at all high points for flushing out air. Transparent plastic tubing, available for a wide pressure range, is recommended as it is useful in disclosing the presence of air bubbles. However, in the case of pressure fluctuations, the damping effect existing in plastic tubing shall be considered (see 7.2.3.4). No leaks shall be permitted in the connecting lines.



a) Pressure manifold with separate connecting lines to manifold



b) Pressure manifold with ring manifold

Key

- 1 Vent
- 2 Pressure measuring instrument
- 3 Manifold
- 4 Ring manifold
- 5 Drain
- 6 Gas collecting chamber

Figure 23 – Types of pressure manifolds

7.2.3.4 Damping devices

Whenever possible, all measurements shall be made under steady-state conditions and pressure fluctuations eliminated at their source. In particular, no fluctuations requiring a damping arrangement for a manometer shall occur in the range of normal operation.

In certain ranges of operation (low values of Q , etc.), fluctuations cannot be avoided. In order to obtain correct readings on a pressure measuring instrument under such conditions, a suitable damping device may be installed, provided the flow through it is laminar and equal in resistance in both directions, thus ensuring a linear viscous resistance. This can be secured by using a capillary tube of about 1 mm bore and suitable length or a specially designed valve. A damping device can also be obtained by using long plastic tubes. Additional damping can be obtained from an air or surge chamber connected to the pressure line ahead of the gauge. The use of an orifice plate is not recommended because it can introduce error due to non-linear damping. A valved bypass around any throttling device shall be provided and kept open except for the short time during which readings are taken. Bending or pinching the connecting lines or inserting any non-symmetrical throttling device (e.g. a valve) is not permitted.

7.2.4 Apparatus for pressure measurement

7.2.4.1 Types of apparatus

Apparatus for pressure measurements fall into two classifications:

- **primary methods** (or instruments), such as liquid column manometers (see 7.2.4.2.1), dead weight manometers (see 7.2.4.2.2) and pressure weighbeams (see 7.2.4.2.3); these methods use only measurements of fundamental quantities (length, mass) and thus do not need any calibration;
- **secondary methods** (or instruments), such as pressure transducers (see 7.2.4.3.1) and other apparatus such as spring gauges (see 7.2.4.3.2), which need to be calibrated against a primary method used as a standard.

The choice of the measuring apparatus shall take into account the requirements of an automatic data acquisition system. Often a combination of primary and secondary methods is applied.

The physical principles and typical examples of possible experimental set-ups are described in the following subclauses for various instruments.

7.2.4.2 Primary methods

7.2.4.2.1 Liquid column manometers

Liquid column manometers are used to measure low pressures or small pressure differences (up to about 5×10^5 Pa, when mercury is used as the manometer liquid). Mostly water or mercury column manometers are used (see Table 5). In some cases, other liquids of known density may be used.

The pressure measured with a liquid column manometer is determined by the following basic relation:

$$p = \rho gh$$

where

h is the height of the liquid column;

ρ is the density of the liquid used in the manometer and taken for the temperature of this liquid.

The tube of a water column manometer shall have a minimum inside diameter of 12 mm in the measuring range to minimize capillary effects. For mercury manometers, this diameter shall be at least 8 mm.

Common types of liquid manometers for gauge pressure or differential pressure are:

a) single-limb manometer (standpipe)

mercury pot with standpipe (Table 5a)):

- If the manometer is calibrated or corrected for the change in level h_1 in the pot, only the height h_2 in the single limb need be read;

water column (standpipe) (Table 5b)).

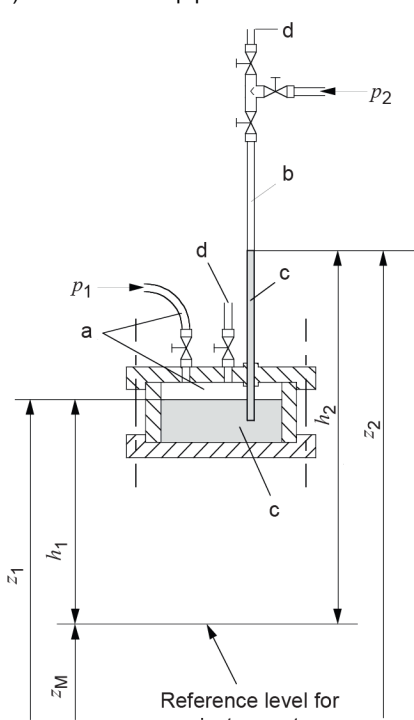
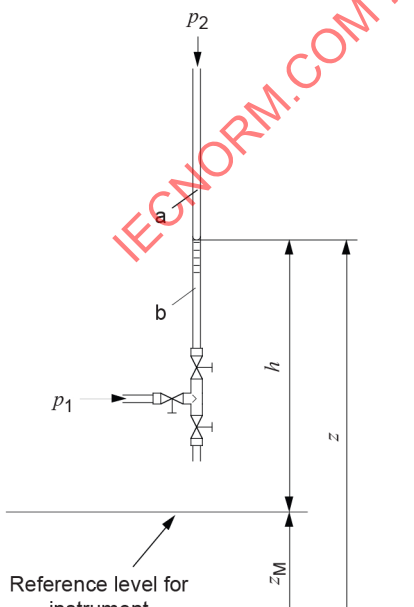
b) U-tube

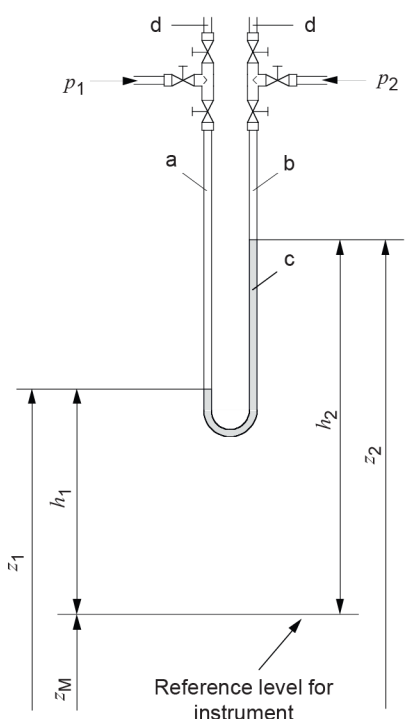
normal U-tube (Table 5c)):

- The heights of the liquid columns in the two legs shall be read simultaneously, which can be achieved by optical reading. Whatever combination of liquid is used, the correct densities of both manometric liquids shall be used.

It is reminded that owing to the harmful effects of mercury on human health, local regulation can prevent the use of this primary method.

Table 5 – Examples of experimental setup of liquid column manometers

Manometer	Gauge pressure $p_2 = p_{\text{amb}}$	Differential pressure $p_2 \neq p_{\text{amb}}$
	$p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	$\Delta p = p_1 - p_2$
a) Pot with standpipe  Reference level for instrument	$p_M = \text{pressure at the reference level of instrument}$ $p_M = g [\rho_{\text{Hg}} (h_2 - h_1) + \rho_{\text{H}_1}]$ $h_1 = z_1 - z_M$ $h_2 = z_2 - z_M$ a = water b = air c = mercury d = vent	$\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (h_2 - h_1)$ $\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (z_2 - z_1)$ a = water b = water c = mercury d = vent
b) Water column (standpipe)  Reference level for instrument	$p_M = \rho g h$ $h = z - z_M$ a = air b = water	Not applicable

Manometer	Gauge pressure $p_2 = p_{\text{amb}}$	Differential pressure $p_2 \neq p_{\text{amb}}$
	$p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	$\Delta p = p_1 - p_2$
c) U-tube 	$p_M = \text{pressure at the reference level of instrument}$ $p_M = g [\rho_{\text{Hg}} (h_2 - h_1) + \rho_{\text{H}_1}]$ $h_1 = z_1 - z_M$ $h_2 = z_2 - z_M$ a = water b = air c = mercury d = vent	$\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (h_2 - h_1)$ $\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (z_2 - z_1)$ a = water b = water c = mercury d = vent
Values of ρ , ρ_{Hg} and ρ_a are given in Annex B.		

7.2.4.2.2 Dead weight manometers

Dead weight manometers (also called piston manometers) may be of the simple or differential type. Their application range depends on the effective piston area A_e and on the sensitivity of the mechanical piston system related to the pressure to be measured. For low pressures or small pressure differences, large effective areas A_e are used (e.g. $A_e \approx 0,000\ 5\ \text{m}^2$ for pressures down to about $3 \times 10^4\ \text{Pa}$) and vice versa (e.g. $A_e \approx 0,000\ 1\ \text{m}^2$ for pressures $> 2 \times 10^5\ \text{Pa}$).

The effective piston diameter d_e may be determined as the arithmetic mean value of the piston diameter d_p and bore diameter d_b :

$$d_e = \frac{d_b + d_p}{2}$$

This apparatus may be used for pressure calculation without further calibration if:

$$\frac{d_b - d_p}{d_b + d_p} \leq 0,001$$

The pressure p measured at the lower end of the piston of a dead weight manometer loaded with the mass m is:

$$p = \frac{mg}{A_e} = \frac{4mg}{\pi d_e^2}$$

Dead weight manometers shall fulfil the following main conditions:

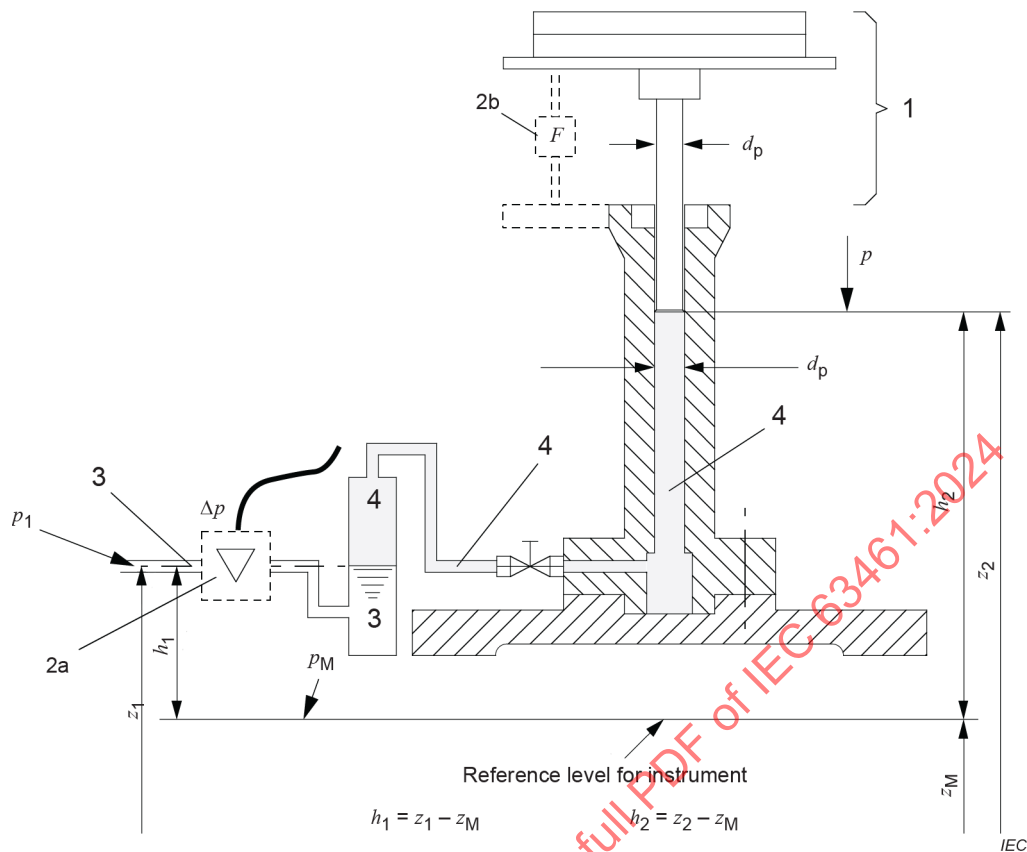
- the effective piston diameter d_e shall be determined within a relative uncertainty $f_{de} < 5 \times 10^{-4}$;
- the friction between piston and bore shall be eliminated by rotating the piston slowly ($0,25 \text{ s}^{-1} \leq n \leq 2 \text{ s}^{-1}$), and the cylinder shall be filled with a suitable fluid, usually by oil of low viscosity ($\nu \approx 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$);
- the axis of the piston shall be vertical. All the acting masses (weights, piston, weight plate etc.) shall be calibrated.

When using a data acquisition system, it is recommended to use a set-up combining a dead weight manometer with a pressure or force transducer (see Figure 24).

The correction curve for these set-ups shall be determined either by checking them against a calibrated dead weight manometer without compensating devices or by loading the weight plate at constant pressure with additional small weights of calibrated appropriate mass, so that the indicator of the compensator indicates zero.

Dead weight manometers of the above type connected to transducers or load cells are preferred for use with automatic data acquisition.

The sensitivity of a dead weight manometer in good condition is less than 0,002 kg, i.e. less than $(0,02 / A_e) \text{ Pa}$ (e.g. $A_e = 0,000 2 \text{ m}^2$, sensitivity: 100 Pa).



Key

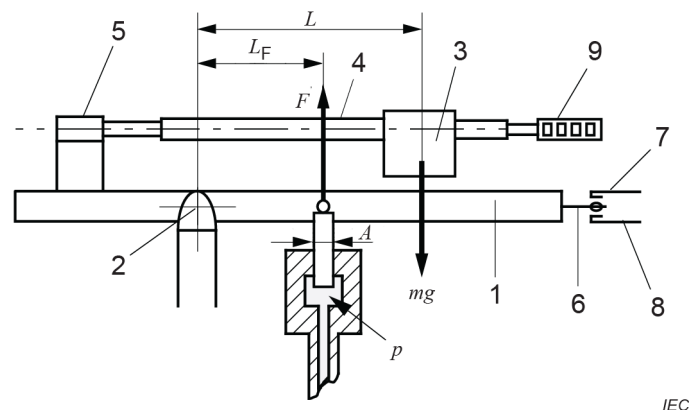
- 1 Acting mass
- 2a Differential pressure transducer
- 2b Force transducer
- 3 Water
- 4 Oil

Case	Method	Equation
2a	Compensation by differential pressure transducer	$p_M = p_1 + \rho g h_1 = p + \rho_{oil} g (h_2 - h_1) + \rho g h_1 + \Delta p$
2b	Compensation by force transducer	$p_M = p_1 + \rho g h_1 = p + \rho_{oil} g (h_2 - h_1) + \rho g h_1 + (4F) / (\pi d_e^2)$

Figure 24 – Dead weight manometer with compensation by pressure or force transducer (example of experimental set-up)

7.2.4.2.3 Pressure weighbeam

An extension of the dead weight manometer is the pressure weighbeam which comprises a weighbeam mounted on frictionless pivots, and bearing on one or more weight manometers or a differential type of weight manometer. The force exerted by the piston of the weight manometer is balanced by a jockey weight moving along the weighbeam (Figure 25). The operation of the weighbeam and jockey weight may be by hand or by an automatic servobalance system. The pressure weighbeam is in principle a primary method but in some cases needs to be calibrated.

**Key**

1	Weighbeam
2	Frictionless pivot
3	Jockey weight (mass m)
4	Measuring screw
5	Servo motor
6, 7 and 8	Electric contacts
9	Counter of revolutions to determine L $p = (mgL) / (AL_F)$
A	Sectional area of the piston
p	Pressure to be measured
$F = pA =$	Force on the weighbeam

Figure 25 – Pressure weighbeam (example of experimental set-up)**7.2.4.3 Secondary methods****7.2.4.3.1 Pressure transducers**

Pressure transducers are electromechanical devices in which mechanical effects produced by pressure are converted into electrical signals.

Although pressure transducers are also used for measuring pressure fluctuations, this subclause deals only with static pressure measurements in steady-state conditions, in order to obtain the mean value.

Depending on the pressure to be measured, the appropriate range for the pressure transducer shall be selected.

Some advantages in using pressure transducers are:

- easy integration into electronic data acquisition systems;
- they usually require negligible fluid flow through pressure taps thus providing rapid and accurate response;
- average values of fluctuating pressure or pressure differences, as well as records of transient phenomena, are easily obtained using readily available electronic equipment.

The pressure transducers should have the following characteristics:

- sufficient calibration stability;
- high repeatability, negligible hysteresis;
- low zero shift and low temperature sensitivity;
- no influence by bias effect when charged by pressure.

Operation with and without filters on the electronic equipment should be conducted to ascertain the absence of bias when filters are operating.

The complete pressure transducer system shall be calibrated under the test pressure conditions. The accuracy of a transducer will mainly be determined by the accuracy of the calibration. The calibration shall be carried out using a primary method, for example a dead weight manometer, which allows checking of the measurements of the transducer system at any time during the test.

To reduce the systematic error, it is also recommended to install two similar transducer systems in parallel and to take simultaneous readings during the test. The transducer systems shall be checked before and after the tests and if the two systems show readings that differ more than their uncertainty due to systematic errors, a comparison with a primary method shall be effected.

7.2.4.3.2 Other apparatus such as a spring pressure gauge

This type of gauge uses the mechanical deflection of a loop of tubing (plan or spiral) or of a diaphragm to indicate pressure. Depending on the pressure to be measured, the corresponding range for a spring pressure gauge shall be selected. It may be used by mutual agreement provided the gauge is of suitable accuracy, is used within its optimum measuring range (usually between 60 % and 100 % of full scale) and is suitably calibrated against a primary method before and after the test.

7.2.5 Calibration of pressure measurement apparatus

7.2.5.1 General procedure of calibration

As already mentioned, the pressure measured with secondary methods (transducers or spring gauges) shall be checked or calibrated. This can be done by comparison against primary methods (see 7.2.4.2.1 and 7.2.4.2.2) or by comparison with the static pressure obtained by a free water level as described in 7.2.5.3, or by a high-precision pressure controller/calibrator (see 7.2.5.2) or with an authorized standard.

It might also be useful to check the influence of the measuring and data acquisition system by means of a dynamic calibration, utilizing a pressure fluctuation generator of variable frequency and known average value, to ensure that no bias exists to affect the average value of the static pressure measurement.

7.2.5.2 High-precision pressure controller/calibrator

If a high-precision pressure controller is used for calibration, the following conditions shall be fulfilled:

- A calibration certificate, which is not older than 12 months, from an accredited institute can be shown. The validity of the certificate can be extended by another period of 12 months if the calibration is checked with a primary method;
- The uncertainty of the calibration method is at least 0,025 % of the measured value, but shall not be less than the pressure controller/calibrator specified resolution.

7.2.5.3 Comparison of gauge pressures with a well-defined static pressure obtained from free water level

Before and after the acceptance test and, if necessary, during the test, the readings of the pressure gauge p_M can be compared with the static pressure for zero discharge, obtained from a free water level taking into account the buoyancy of water in air:

$$p = (\rho - \rho_a) g \Delta z$$

7.2.6 Vacuum measurements

7.2.6.1 General requirements

For vacuum measurements, 7.2.2 to 7.2.4 also apply, except as indicated in 7.2.6.2.

7.2.6.2 Connecting lines for vacuum measurements

The connecting lines shall either be completely filled with water or, if air is used, shall be transparent to permit observation of the water level, if present. Such lines, when filled with water, shall be flushed carefully and frequently between runs to remove any air coming out of solution or entering through the pressure tap and to maintain the water in the pressure lines at the same temperature as in the conduit. All lines and connections shall be airtight (free from leaks). Flexible tubing may be used as pressure lines only if they are sufficiently rigid to avoid distortion or collapse by ambient pressure. Transparent plastic tubing is very convenient for observing air bubbles, if any.

7.2.7 Uncertainty in pressure measurements

Estimations for the absolute uncertainties e_p (at 95 % confidence level) due to systematic errors that can be expected:

- liquid mercury/water column manometers:
 $\pm 50 \text{ Pa}$ to $\pm 300 \text{ Pa}$
- liquid water/air manometers:
 $\pm 10 \text{ Pa}$ to $\pm 50 \text{ Pa}$
- dead weight manometers:
 $\pm 1 \times 10^{-3} p$ to $\pm 3 \times 10^{-3} p$
- pressure weighbeams:
 $\pm 2 \times 10^{-3} p$ to $\pm 5 \times 10^{-3} p$
- spring pressure gauges:
 $\pm 3 \times 10^{-3} p_{\max}$ to $\pm 10 \times 10^{-3} p_{\max}$ (where $p_{\max}$ is the full-scale reading of the instrument)
- pressure transducers:
 $\pm 1 \times 10^{-3} p_{\max}$ to $\pm 5 \times 10^{-3} p_{\max}$ (where $p_{\max}$ is the full-scale reading of the instrument)

These values are valid for stable pressure conditions. It should be noted that pressure fluctuations at the pump high-pressure side can be important and more or less asymmetrical, so that when they are not correctly damped (see 7.2.3.4), the uncertainties may be increased.

7.3 Free water level measurement (see also ISO 4373)

7.3.1 General

In general, the determination of the specific hydraulic energy of the model machine should be based on pressure measurement within the water passages in accordance with 8.2.1.2.

However, in test rigs with free and stable water levels, the specific hydraulic energy can be determined on the basis of measurements of the free water levels (see 8.2.3.2).

The measurement of free water levels is also necessary for some methods of discharge measurements (see, for example, 7.1.4.2).

7.3.2 Choice of water level measuring sections

The measuring section for the determination of a free water level shall be chosen to satisfy the following requirements:

- if no special similarity requirements are imposed, the model shall be arranged so that the flow is steady and free of disturbances. Especially, the free water surfaces at the measuring sections shall be stable. Sufficient submergence should therefore be provided;
- the area used to determine the mean water velocity shall be accurately defined and readily measurable.

7.3.3 Number of measuring points in a measuring section

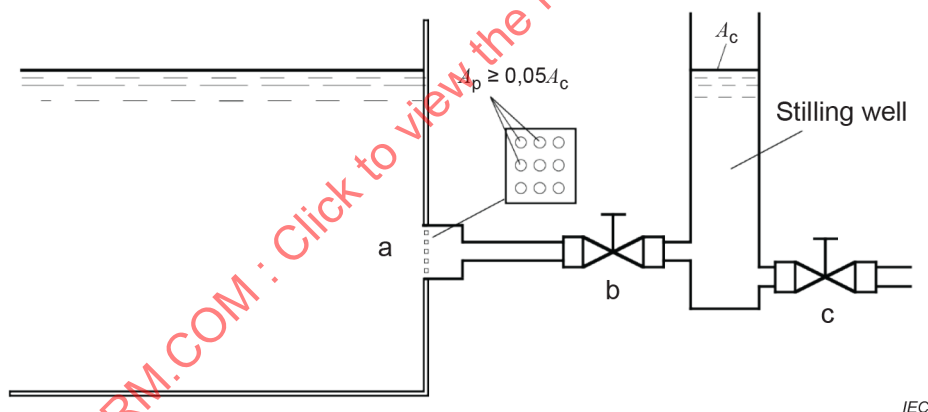
Measurement of free water levels shall be obtained where possible for at least two points in every measuring section or in each passage of a multiple passage measuring section and the average of the readings taken as the free water level.

7.3.4 Measuring methods

7.3.4.1 General

Commonly, a free water level is measured from a reference level z_M of the instrument, determined by means of a high-precision instrument in relation to other reference levels.

The free water level is generally not measured directly in the section, but in a stilling well connected to the measuring section as shown in Figure 26.



Key

a Perforated plate, flush with the wall

b Disconnecting valve

c Purge valve

A_p Total cross-sectional area of perforation

A_c Cross-sectional area of the well

Figure 26 – Stilling well

7.3.4.2 Point or hook gauge

Point or hook gauges (Figure 27) may be used to determine the level of calm water, preferably in stilling wells or directly in the flow if the free level is particularly undisturbed. In place of the normal visual indication of contact with the water, electrical, optical or other indicators may be used, provided they are calibrated against the direct visual method.

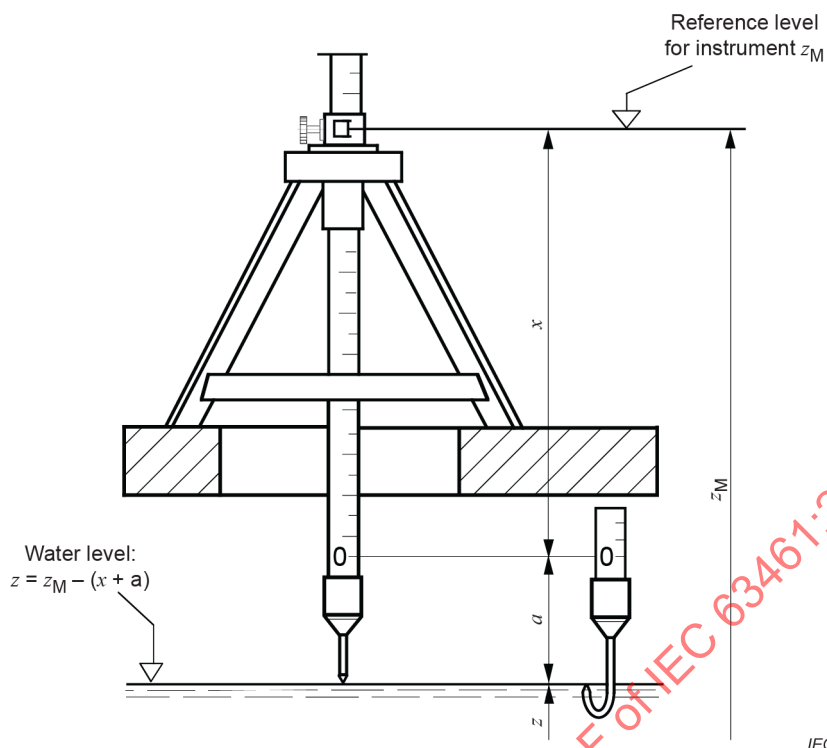


Figure 27 – Point and hook gauges

7.3.4.3 Float gauge

Float gauges may be used where the water level varies a great deal. The float diameter shall be at least 150 mm. The minimum dimension of a stilling well shall be 200 mm. Gauges shall be sensitive within 1 mm when manually displaced from the true reading (resolution of $\pm 0,001$ m).

7.3.4.4 Pressure measuring device

Immersible pressure transducers or any other pressure measuring device, including liquid manometers (standpipe) may be used (see 7.2) to determine the free water level. The pressure indication shall be checked with no water flowing.

7.3.4.5 Bubbler with compressed air

The free water level may also be determined by means of the pressure inside a tube filled with compressed air, the so-called gas purge "bubbler" technique (for detailed information, see IEC 60041:1991).

7.3.4.6 Other methods

Other methods may be used, for example ultrasonic devices and capacitive methods, as long as they meet the required accuracy (see 7.3.5).

7.3.5 Uncertainty in free water level measurement

Estimations for the absolute uncertainties e_z (at 95 % confidence level) due to systematic errors that could be expected in the case of calm water conditions and velocity smaller than or equal to 1,0 m/s (the lower value referring to a velocity close to zero):

- point or hook gauges:
 $\pm 0,001$ m to $\pm 0,003$ m

- float gauges:
± 0,001 m to ± 0,003 m
- immersible pressure transducers:
± $0,5 \times 10^{-3} z_{\max}$ to $5 \times 10^{-3} z_{\max}$ (where $z_{\max}$ is the full scale reading of the instrument)
- bubbler with compressed air:
± 0,001 m to ± 0,003 m
- ultrasonic device:
± 0,002 m to ± 0,010 m

In the case of very turbulent flow and $v > 1,0$ m/s, for example near the outlet of a turbine draft tube, the uncertainties can be considerably higher.

7.4 Shaft torque measurement

7.4.1 General

The calculation of mechanical power of the runner/impeller P_m requires the determination of the torque applied to the runner/impeller T_m :

$$P_m = 2\pi n T_m$$

where

$$T_m = T + T_{Lm}$$

T_{Lm} is the friction torque due to seal and bearing arrangement.

Principally, two different measuring systems can be applied for torque measurement:

- those of the type "swinging frame", where T_{Lm} is a so-called "inner torque", i.e. T_{Lm} is taken into account by the system itself (in the following, described as "bearing of rotating parts in balance", see for instance Figure 28 and Figure 29).
- those where T and T_{Lm} are measured separately (in the following, described as "bearing of rotating parts not in balance", see for instance Figure 30).

The shaft torque T of runner/impeller may be absorbed or generated by:

- an electrical machine, usually a motor/generator with variable speed,
- or absorbed by different types of brakes:
- eddy-current brake,
 - hydraulic brake,
 - mechanical brake.

7.4.2 Methods of torque measurement

7.4.2.1 Primary method

In the primary method, the torque T is determined by the force F applied to a lever arm multiplied by the radius r at which it is applied:

$$T = F \times r$$

The actual force applied to balance the swinging frame may be measured by:

- a) weighing masses on a lever system (calibrated weights and calibrated lever arm). This is in principle the basic primary method.
- b) one of the following methods, which can be calibrated *in situ* by the basic primary method above:
 - force transducer,
 - manometer (via a rotating piston),
 - mechanical balance.

To increase the accuracy in determining the total force, it is recommended to counterbalance a part of the force acting on the arm by means of calibrated weights.

7.4.2.2 Secondary method

A torquemeter may be used provided its accuracy is acceptable to all parties and it is calibrated by the primary method. A torquemeter comprises a length of shafting whose torsional strain, when rotating, is converted to an electrical output quantity by optical, electrical or other means. The design and the arrangement of this type of torquemeter shall be such that the measurement is not influenced by speed, temperature, axial thrust or radial thrust.

7.4.3 Methods of absorbing/generating power

7.4.3.1 Motor/generator with variable speed

This method comprises a machine for absorbing and generating power electrically, suitably mounted so that the mechanical torque can be measured. This device can be used for both turbine and pump models.

7.4.3.2 Eddy-current brake

The operation of this electromagnetic brake is restricted to absorbing power.

7.4.3.3 Hydraulic brake

This brake absorbs power hydrodynamically. It is unsuitable for use at low speeds as its power absorption varies with n^3 .

7.4.3.4 Mechanical brake

This brake absorbs power by friction. It has the advantage that high torques can be applied at low speeds, even down to zero rotational speed. The torque applied shall be steady and the mechanical system shall be vibration free.

7.4.4 Layout of arrangement

7.4.4.1 General

Figure 28 to Figure 33 show practical arrangements comprising primary and secondary methods of torque measurement. All arrangements shown can be adapted for either a horizontal axis or a vertical axis test rig.

Figure 28 and Figure 29 illustrate the principle of the balance arrangement. The torque acting on the runner/impeller is measured at the torque arm of the swinging frame.

If the swinging frame, as shown in Figure 29, is formed by two separate frames, the torques acting on each frame shall be measured and added algebraically.

Figure 30 shows an arrangement not fully in balance, therefore the losses due to bearing and seal shall be measured separately.

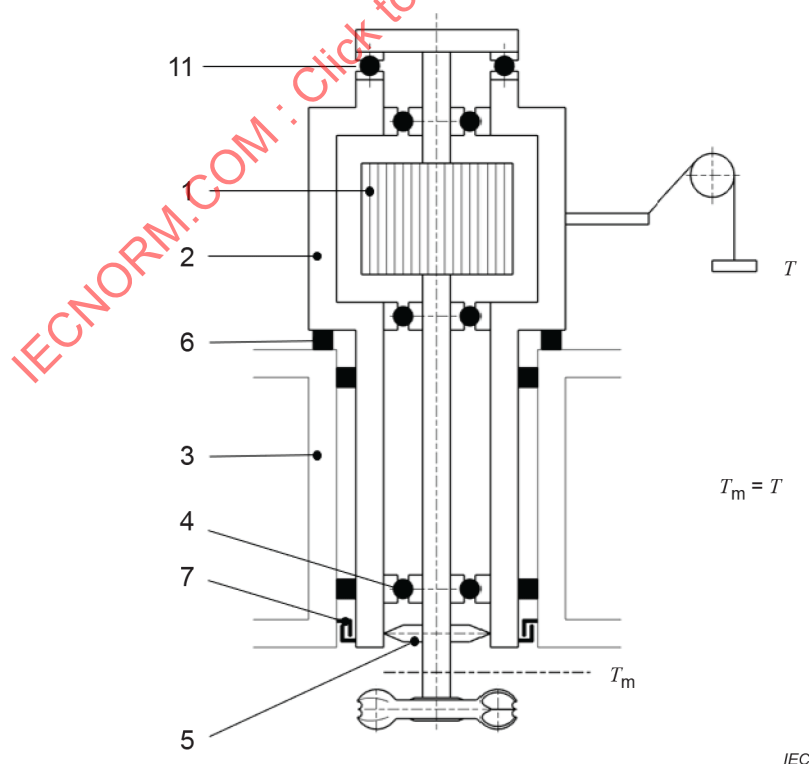
Figure 31 illustrates an arrangement using a torquemeter.

Figure 32 and Figure 33 show variations with an additional guide bearing which may be balanced or not.

The nomenclature for Figure 28 to Figure 33 is given in Table 6.

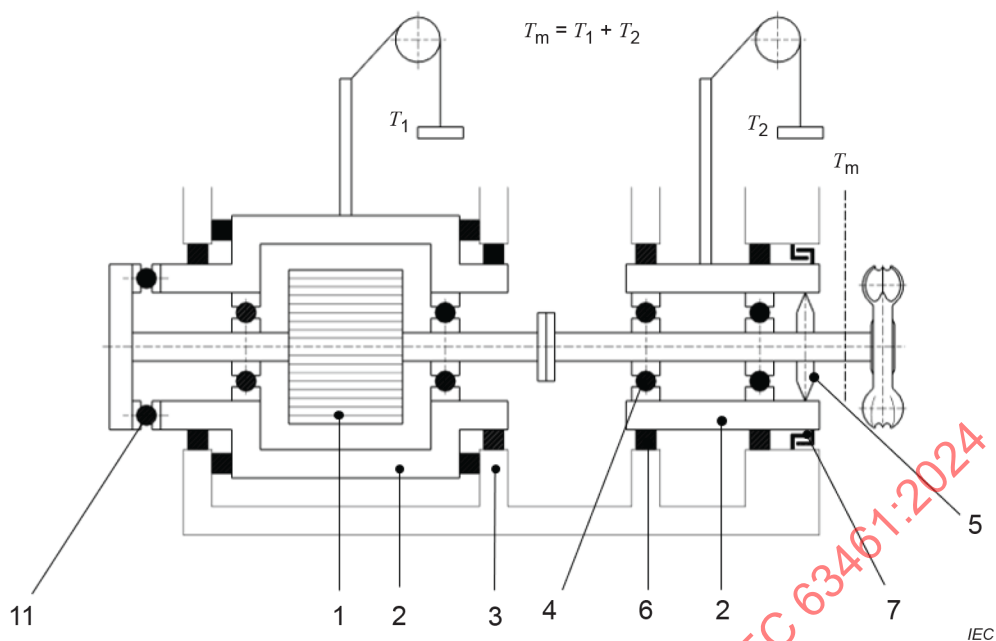
Table 6 – Nomenclature for Figure 28 to Figure 33

Item	Description
1	rotating part
2	swinging frame
3	stationary part
4	bearing of rotating part in balance
5	mechanical seal in balance
6	low friction bearing of the swinging frame
7	labyrinth seal, membrane
8	bearing of rotating part not in balance
9	mechanical seal of rotating part not in balance
10	torquemeter
11	axial thrust bearing
— — —	reference section for torque measurement



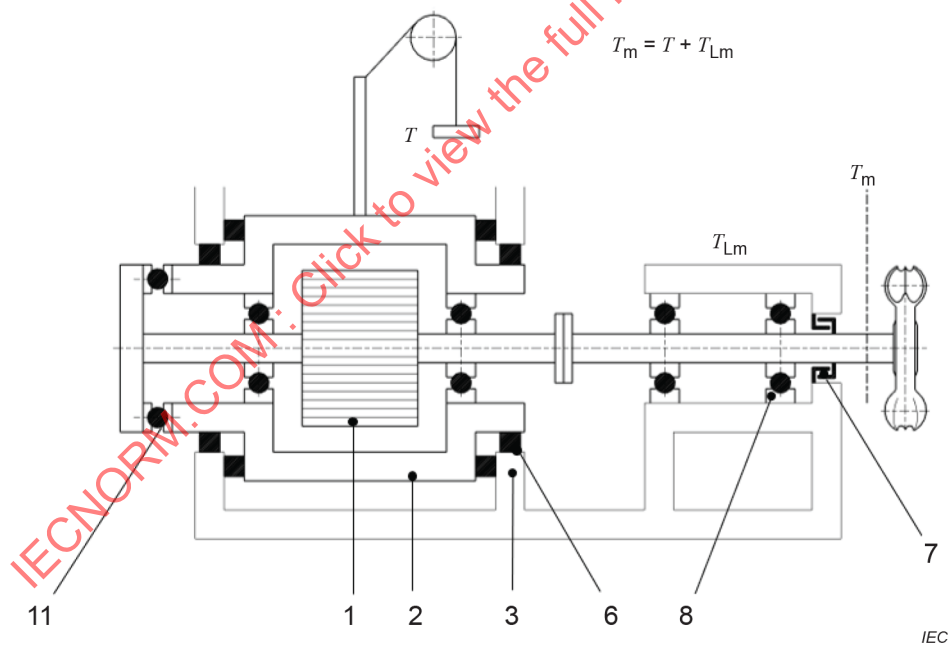
See Table 6 for the nomenclature.

Figure 28 – Balance arrangement



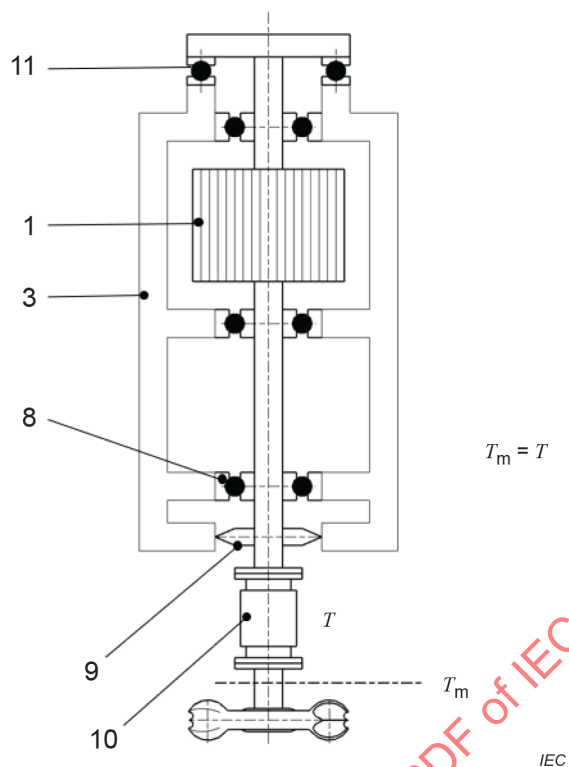
See Table 6 for the nomenclature.

Figure 29 – Balance arrangement with two separate frames



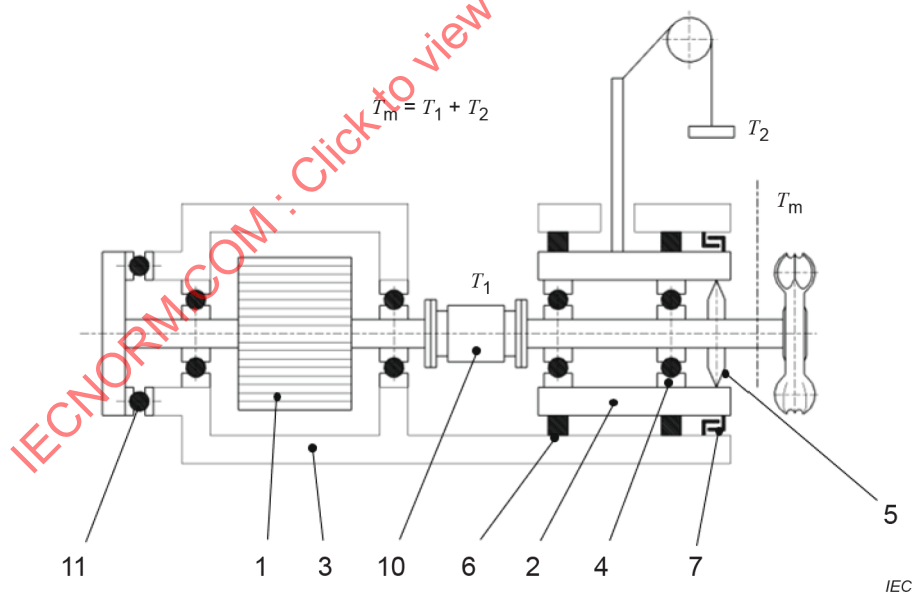
See Table 6 for the nomenclature.

Figure 30 – Arrangement with machine bearings and seals not in balance



See Table 6 for the nomenclature.

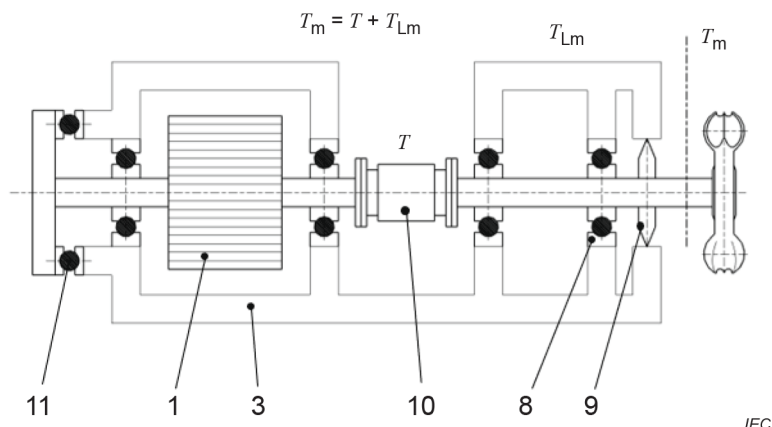
Figure 31 – Arrangement using a torquemeter



Also valid for a vertical arrangement.

See Table 6 for the nomenclature.

Figure 32 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals in balance



Also valid for a vertical arrangement.

See Table 6 for the nomenclature.

Figure 33 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals not in balance

7.4.4.2 Suspension of swinging frame

To meet the requirements regarding uncertainty of measurement over the measured range, special low friction bearings are necessary for suspending the swinging frame, i.e. oil or water hydrostatic bearings. The swinging frame should be perfectly balanced, otherwise it is necessary to limit the rotational movement.

7.4.4.3 Windage losses

Whatever speed of the motor/generator, there shall be no torque reaction caused by windage or by a blower; if there is, this shall be taken into account.

7.4.4.4 Cooling fluid connections

The torque measuring device shall be designed in such a way that the cooling fluid enters and leaves without introducing errors due to tangential velocity components. Flexible pipes (if used) shall impose no measurable tangential restraint, especially when under pressure. Dash-pots (if used) shall be shown to impose equal resistance to motion in either direction. Furthermore, the shaft glands retaining the liquid shall either impose no sensible frictional torque or be provided with a torque measurement device.

7.4.4.5 Seals

If sealing between swinging and fixed parts is made by means of friction or membrane seals, these shall be calibrated.

7.4.4.6 Electrical leads

Electrical connections shall impose no measurable tangential restraint. Braided flexible copper leads or mercury pots are suitable for this purpose.

7.4.5 Checking of system

7.4.5.1 General

The checks described below are recommended to verify the correct operation of the whole torque measuring arrangement; nevertheless, the measuring device shall be calibrated.

7.4.5.2 Sensitivity test

The sensitivity of a testing arrangement indicates the lowest torque difference which can be measured through the system. The sensitivity strongly depends on the layout and capacity of the arrangement. Reduced sensitivity can result from incorrect functioning.

Depending on the layout and capacity of the arrangement used, the sensitivity shall be in a range of 0,05 N·m to 0,5 N·m, whereby the low value is valid for $T_{m,max} < 500 \text{ N·m}$.

7.4.5.3 Speed test

This test is carried out with a dismantled runner/impeller or a disconnected shaft. The system functions correctly if the mechanical torque T_m remains zero for the whole range of speeds.

7.4.5.4 Counterbalancing

During this check the applied torque/force, or part of it, is counterbalanced by means of certified masses. The system functions correctly if the display is reduced according to the counterbalancing mass.

7.4.6 Calibration

7.4.6.1 Primary method

During calibration the following quantities shall be measured:

- length of brake lever;
- force on brake lever;
- tare weight of the brake lever if necessary.

The force acting on the brake lever shall be applied by means of certified masses in the direction of both increasing and decreasing loads. Metal tapes and frictionless pulleys shall be used for applying the torque balancing weights.

7.4.6.2 Secondary method

When using this method, a calibration of the arrangement against a primary method shall be carried out. The rotating torquemeter can also be calibrated *in situ* against a reference, certified, non-rotating torquemeter.

7.4.6.3 Friction torque T_{Lm}

If part of bearing/sealing arrangement is not included in the swinging frame, the relevant total friction torque T_{Lm} shall be determined by an appropriate test taking into account the dependency on speed and shaft seal pressure.

7.4.7 Uncertainty in torque measurement (at a confidence level of 95 %)

7.4.7.1 Uncertainty in the shaft torque measurement by primary method

7.4.7.1.1 Length of lever arm r

The length of lever arm r should be measured within:

$$f_{r,s} = \pm 0,05 \% \text{ to } \pm 0,1 \%$$

7.4.7.1.2 Force F

The force F acting on the lever arm should be measured within:

$$f_{F,s} = \pm 0,05 \% \text{ to } \pm 0,1 \%$$

7.4.7.2 Uncertainty in the shaft torque measurement by secondary method

The uncertainty due to systematic errors in the shaft torque measurement strongly depends on the arrangement used. The expected uncertainty should be within:

$$f_{T,s} = \pm 0,05 \% \text{ to } \pm 0,15 \%$$

7.4.7.3 Uncertainty in the measurement of the friction torque T_{Lm}

Where the bearing/seal arrangement is not included in the swinging frame system, the friction torque T_{Lm} should be measured within:

$$f_{T_{Lm},s} = \pm 0,02 \% \text{ to } \pm 0,05 \% \text{ of } T_{m,max}$$

7.4.7.4 Total uncertainty in the runner/impeller torque measurement

Using the above uncertainties (see 7.4.7.1 to 7.4.7.3) the relative uncertainty due to systematic errors in the runner/impeller torque measurement can be calculated as shown below:

- a) for the primary method with T_{Lm} , measured in the common swinging frame (see Figure 29 and Figure 30):

$$f_{Tm,s} = \sqrt{(f_{r,s}^2 + f_{F,s}^2)}$$

- b) for the secondary method (see Figure 31):

$$f_{Tm,s} = f_{T,s} \text{ (defined in 7.4.7.2)}$$

- c) for the primary method with T_{Lm} , not measured with swinging frame (see Figure 30):
the absolute uncertainty due to systematic errors is:

$$e_{Tm} = \sqrt{T^2 f_{T,s}^2 + T_{Lm}^2 f_{T_{Lm},s}^2} = \sqrt{T^2 (f_{r,s}^2 + f_{F,s}^2) + T_{Lm}^2 f_{T_{Lm},s}^2}$$

and the relative uncertainty due to systematic errors is:

$$f_{Tm} = \frac{e_{Tm}}{T_m}$$

- d) for the secondary method with T_{Lm} not measured with a swinging frame (see Figure 33):
the absolute uncertainty due to systematic errors is:

$$e_{Tm} = \sqrt{T^2 f_{T,s}^2 + T_{Lm}^2 f_{Lm,s}^2}$$

and the relative uncertainty due to systematic errors is:

$$f_{Tm} = \frac{e_{Tm}}{T_m}$$

7.5 Rotational speed measurement

7.5.1 General

Determination of the mechanical power of the runner/impeller requires knowledge of the rotational speed of the runner/impeller shaft.

7.5.2 Methods of speed measurement

The rotational speed of the turbine/pump model may be measured by one of the following methods:

- counting of pulses generated by the model shaft, using an electronic counter and timebase. The pulse generator may be electrical or optical;
- electrical frequency meter connected with a generator directly driven by the model shaft;
- electrical high-precision tachometer comprising a stable permanent magnet directly driven by the model shaft.

7.5.3 Checking

Usually, the speed measurement device is not truly calibrated, but checked:

- either by comparison with another speed measurement device;
- or by checking separately the counting of pulses and the accuracy of the time base.

In case of malfunction, possible errors are:

- missing pulses;
- change of time base.

7.5.4 Uncertainty of measurement

Using the aforementioned instrumentation, the uncertainty due to systematic errors is expected to be within

$$f_{n,s} = \pm 0,01 \% \text{ to } \pm 0,05 \%$$

8 Test execution and results

8.1 General

It is recognized that no physical quantity can be measured without error. Consequently, the result of any measurement is worthless if not accompanied with the associated uncertainty estimated at a given confidence level. General prescriptions on analysis and combination of uncertainties are given in 6.3.

The quantities to be measured during a model test to verify the main hydraulic performance guarantees defined in 9.2 require a high level of accuracy. For this reason, the prescriptions given in this clause of this document are mandatory in order that the test may be deemed to be in accordance with this document. Subclause 8.3 gives requirements on how to calculate the quantities (power, efficiency) which are derived from the basic quantities (discharge, specific hydraulic energy, shaft torque, speed of rotation).

Additional quantities are determined mainly for guidance, even if some of them can be of contractual interest (see Clause 10).

8.2 Determination of E

8.2.1 General

8.2.1.1 Object

The specific hydraulic energy E of the machine shall be determined in any test on a hydraulic model machine. The quantities for the determination of E are measured at steady-state conditions as an average over time. The formulae for their evaluation are given in 3.4.7.1.

8.2.1.2 Method of determination

To determine the specific hydraulic energy acting on the model machine, it is necessary to evaluate the specific hydraulic energy of water in the high-pressure and low-pressure reference sections.

Whenever possible, the absolute pressure, the mean velocity and the elevation should be directly determined in the reference sections.

In some cases, due to special model test equipment, it can be mutually agreed to choose a measuring section located as near as possible to the corresponding reference section or even to replace pressure measurements by free water level measurements.

The measurement of the pressure is described in 7.2, whereas the measurement of free water level, although seldom used for model tests, is described in 7.3.

8.2.1.3 Steady-state conditions and number of readings

Readings required to determine the specific hydraulic energy shall be taken at regular intervals and when steady-state conditions prevail as defined in 8.5.3. The number of readings and the intervals between them shall provide for a sufficiently good approximation of the mean value, taking into account the performance of the data acquisition system (see 8.5.3 and 6.1).

8.2.2 Determination of the specific hydraulic energy E

8.2.2.1 Measuring sections

8.2.2.1.1 General

The basic conditions to achieve an accurate determination of the specific hydraulic energy are described in 8.2.1.2. Requirements for the choice of a pressure measuring section are given in 7.2.2.

8.2.2.1.2 Shifted measuring sections

Model acceptance tests will generally be conducted with measurements at the reference sections of the machine which are specified in the contract. Only in exceptional cases may the measuring sections be different from the reference sections. This can be necessary if flow disturbances occur at the reference section, caused by the machine or by the inflow conditions;

such a shifting shall be agreed by the parties. In such cases, the components influencing the flow pattern may also be modelled, if contractually agreed.

An example for shifted measuring section is a butterfly valve close to the high-pressure reference section, requiring relocating the measuring section since it is difficult to assess the effect of the valve on the measurement.

8.2.2.1.3 Specific hydraulic energy correction for shifted measuring sections

When the measuring section is not the reference section, the loss of specific hydraulic energy between the measuring section and the reference section shall be taken into account, due consideration being given to the flow direction and distribution and the relative position of the two sections. Evaluation of this loss may be based on theoretical knowledge or practical experience.

Before a decision is made to use a different measuring section, due consideration shall be given to the uncertainty introduced by the loss calculation compared to that arising from unsatisfactory measuring conditions at the reference section.

8.2.2 Reference levels

8.2.2.1 Reference datum

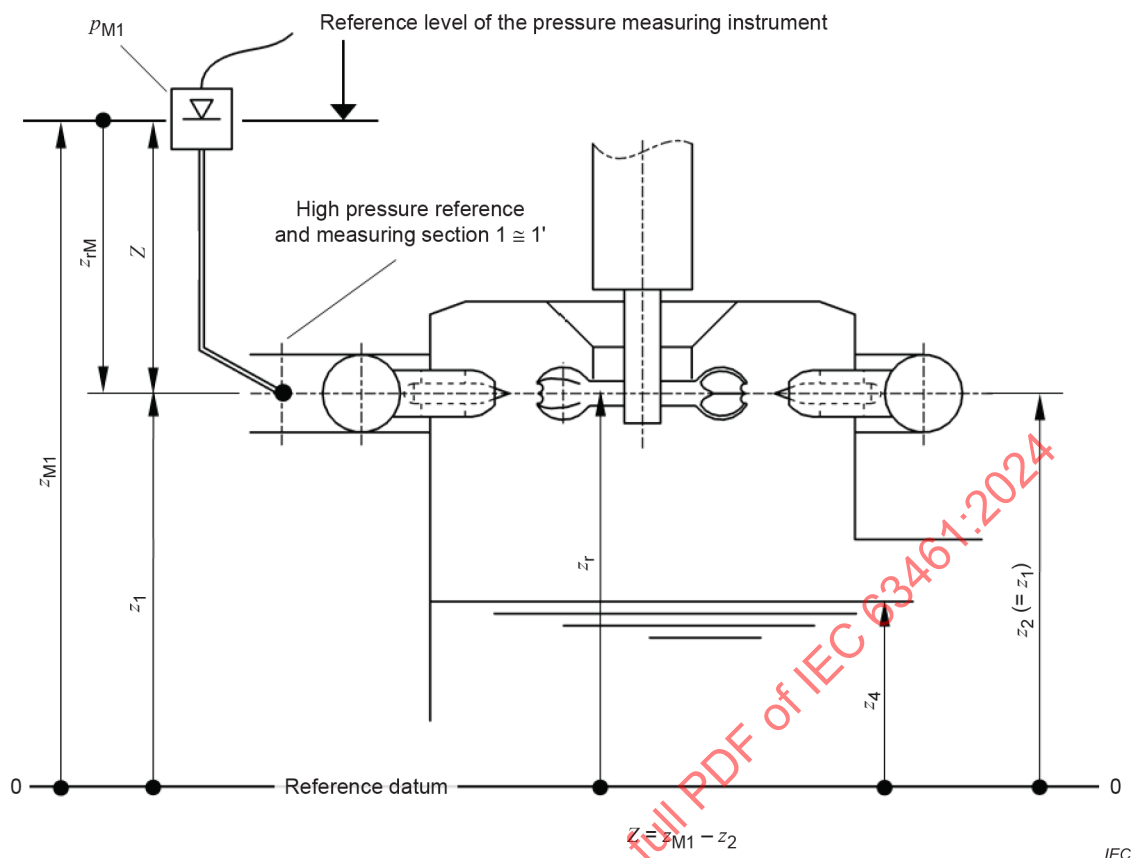
All elevations shall be referred to a reference datum such as a reference level of the test rig or the reference level of the machine (see 3.4.8.2). An example of main elevations and heights is shown in Figure 34.

8.2.2.2 Difference of elevations

It is only important to establish accurate differences of elevations. The most important difference of elevations for model tests is the difference between reference level of machine z_r and reference level of pressure measuring instrument z_M :

$$Z_{rM} = z_r - z_M$$

If the reference level of all the pressure measuring instruments is the same and if it is taken as reference datum, then $Z_{rM} = z_r$ (see Figure 34).



Special case: $z_{M1} = 0$ and $z_{M2} = 0$, then $Z_{rM1} = Z_{rM2} = z_r$

Figure 34 – Example showing main elevations, heights and reference levels of the test rig and model machine

8.2.2.3 Water density (see 4.3)

From the definition of specific hydraulic energy of the machine in 3.4.7.1 the mean water density $\bar{\rho}$ shall be calculated as the mean of densities at the two reference sections. As the temperature difference between inlet and outlet of the machine is small, the temperature of the water at the low-pressure reference section may be used for calculating the densities involved in the evaluation of $\bar{\rho}$.

The values of distilled water density (see 4.3.1.3 and Table B.2) can normally be used as water density ρ_{wa} for the determination of E or $H = E / g$ because:

- the value of the density for the actual water ρ_{wa} in the model test equipment differs rather little from the value of the density for distilled water ρ_{wd} : in general the deviation is smaller than 0,05 % (see 4.3.1.2);
- the hydraulic power $P_h = E(\rho Q)_1$, (see 3.4.9.1), as the main hydraulic quantity for the determination of the efficiency, depends only to second order accuracy on density, if the specific hydraulic energy of the model machine is predominantly obtained by pressure measurements (see simplified formulae in 8.2.3).

In special cases, it can be applicable to determine the density ρ_{wa} of the actual water used (see 4.3.1.2).

8.2.2.4 Specific kinetic energy

By convention, the specific kinetic energy term in a reference section is determined from the mean velocity of the water perpendicular to that section and is taken as $E_k = v^2 / 2$.

The mean velocity v is the actual discharge passing through the reference section divided by the area of the same reference section⁶. This area shall be measured when model similarity is checked. The same convention is applied when the measuring section differs from the reference section within the limits of the machine.

8.2.2.5 Uncertainty in the determination of specific hydraulic energy E

The determination of E shall be adapted for each method and arrangement in accordance with the examples described in 8.2.3.

In F.3.4, an example for the determination of the relative uncertainty due to systematic errors in the measurement of specific hydraulic energy f_E is shown.

In order to account for the effect of non-uniformity of the pressure distribution in the measuring sections (see 7.2.3.1), an additional uncertainty $f_{\Delta E}$ is added arithmetically to the total relative uncertainty f_E such that $f_{E,corr} = f_E + f_{\Delta E}$.

8.2.3 Simplified formulae for E

8.2.3.1 General

The general formula given in 3.4.7.1 is a convenient approximation of the exact value of the specific hydraulic energy of the machine. Further simplifications are possible in each specific case and approximations may be introduced for example when the water compressibility or the difference in ambient pressure between sections 1 and 2 is negligible.

It can be assumed that the acceleration due to gravity and the ambient pressure are constant throughout the test rig:

$$\bar{g} = g_1 = g_2 = g$$

and

$$p_{amb1} = p_{amb2} = p_{amb}$$

⁶ For the local velocity v_i in the streamline of a fluid, the specific kinetic energy is $E_{k,i} = v_i^2 / 2$. The mean value of the specific kinetic energy of the flow passing a cross-section A (with the mean axial velocity v) can be expressed as $E_k = \alpha v^2 / 2$, the kinetic energy coefficient α being defined (see ISO 4006) by:

$$\alpha = \int_A \frac{v_i^2 v_{m_i}}{v^3} \frac{dA}{A}, \quad v_{m_i} \text{ being the meridional component of } v_i.$$

The coefficient α would be equal to 1 for a uniform velocity distribution (rectangular velocity profile) and is always greater than 1 in industrial flow.

In testing hydraulic machines, the actual flow configuration in a measuring section shows a non-uniform velocity distribution arising from the layout of the plant and the operation of the machine. It is usually assumed that the flow configuration in the model and in the prototype is approximately the same. However, it is impracticable and time-consuming to determine α during model tests from a detailed measurement of the velocity distribution. Therefore, it is conventionally agreed to assume $\alpha = 1$ and thus $E_k = v^2 / 2$.

The simplified formulae established in this subclause are typical for the described measuring installations. Only the most common installations are reviewed. A simplified formula shall not be used for a different installation without carefully examining its adequacy.

8.2.3.2 Determination of E from pressure measurements (see 7.2)

8.2.3.2.1 Basic equation

For each method described in this section, E is calculated using the following basic equation:

$$E = gH = \frac{p_{\text{abs1}} - p_{\text{abs2}}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

8.2.3.2.2 Separate measurement of pressure

For Pelton turbines (see Figure 34 and Figure 35), when the housing is under atmospheric pressure, only the measurement of the pressure p_1 at the high-pressure reference section is required. Thus, further simplifications can be introduced if the general formula from 8.2.3.2.1 is applied to Pelton turbines.

By convention, v_2 is taken as zero, elevation z_2 of the low-pressure reference section is the mean elevation of all contact points of the jet axis with the Pelton jet circle and the pressure inside the housing is assumed equal to the ambient pressure, provided the housing is not pressurized and is supplied with sufficient air.

The difference in ambient pressure between z_{M1} and z_2 is neglected because gZ is small compared to E . Therefore:

$$p_{\text{amb M1}} = p_{\text{amb2}} = p_{\text{amb}}$$

Further it is assumed:

$$Z\rho_1 / \bar{\rho} = Z$$

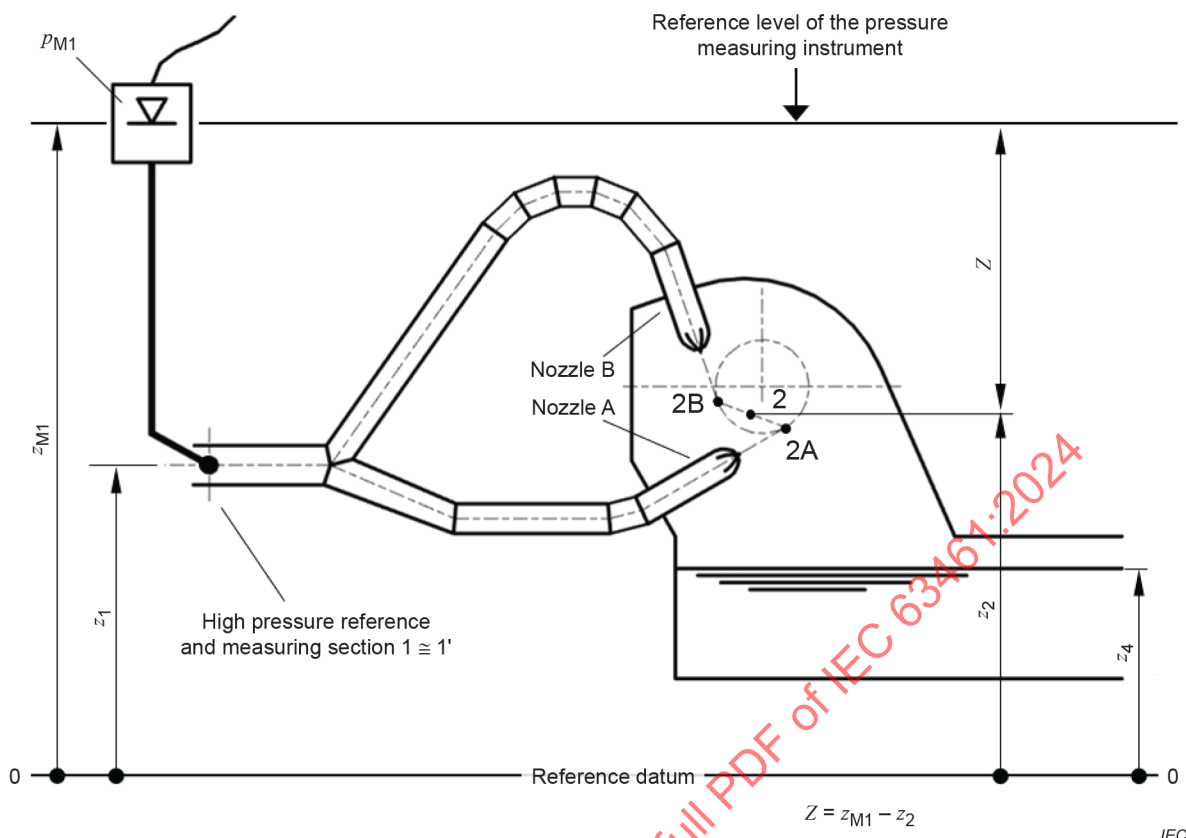
Where p_{M1} is the gauge pressure measured at z_{M1} .

$$p_{\text{abs1}} = p_{M1} + (z_{M1} - z_1)\rho_1 g + p_{\text{amb}}$$

Since $p_{\text{abs2}} = p_{\text{amb}}$, and assuming that $v_2 = 0$, the simplified formula for specific hydraulic energy is:

$$E = \frac{p_{M1}}{\bar{\rho}} + g(z_{M1} - z_2) + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_{M1}}{\bar{\rho}} + gZ + \frac{v_1^2}{2}$$

If the housing is pressurized, the ambient pressure in the housing shall be measured and accounted for when determining E ($p_{\text{amb2}} \neq p_{\text{amb1}}$).



In the case of multiple nozzles, the elevation z_2 of the low-pressure reference section is defined as the average of the elevations of the points of contact (2A and 2B in the sketch).

**Figure 35 – Pelton turbines with horizontal axis:
determination of specific hydraulic energy of the machine**

8.3 Determination of power and efficiency

8.3.1 Hydraulic power

The determination of hydraulic power requires the knowledge of the specific hydraulic energy of the machine and of the mass flow rate through the high-pressure reference section of the model. The formula is:

$$P_h = E(\rho Q)_1$$

Any transfer of water to or from the system between the reference section and the discharge measuring section shall be taken into account. Where the volume flow rate is measured, the value obtained shall be associated with the value of water density in the conditions of pressure and temperature prevailing in the discharge measuring section.

Clause 4 explains how to determine the values of physical quantities such as the local acceleration due to gravity, the water density, etc. either by direct measurement or from internationally recognized formulae or tables. Methods of discharge measurement are described in 7.1. Methods of specific hydraulic energy determination, from pressure measurement in accordance with 7.2 (or possibly from water level measurement in accordance with 7.3), are described in 8.2.

8.3.2 Mechanical power

Calculation of the mechanical power from the measurement of electrical power at the motor/generator terminals and from the efficiency of the latter is not recommended for model acceptance tests. Thus the determination of mechanical power at the runner/impeller requires knowledge of the torque supplied by/applied to the runner/impeller and of the rotational speed:

$$P_m = 2\pi n T_m$$

Methods of torque measurement are described in 7.4. Methods of rotational speed measurement are described in 7.5.

8.3.3 Hydraulic efficiency

The purpose of a model acceptance test on a hydraulic machine, in accordance with this document, is to compare the achieved hydraulic performance, expressed either as the measured model performance or transposed to prototype performance, with guarantees given by the supplier.

Since there is no correlation between the mechanical losses (power dissipated in the guide bearings, thrust bearings and shaft seals) of the model and those of the prototype, the comparison shall be based on the mechanical power of runner/impeller P_m (see 3.4.9.3) and hydraulic efficiency η_h (see 3.4.10.1) and not the mechanical power of the machine P (see 3.4.9.2) and efficiency η (see 3.4.10.3).

Hydraulic efficiency is calculated from the mechanical power P_m transmitted through the coupling of the runner and the shaft and the hydraulic power P_h exchanged with the water. It is given by:

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$$

The principle of the method involves the measurement of discharge Q , specific hydraulic energy E , torque T and rotational speed n .

The direct determination of hydraulic efficiency by the thermodynamic method is not recommended for model acceptance tests.

From the definitions given in the previous subclauses, the hydraulic efficiency of a model in the operating conditions prevailing during a point can be calculated by:

$$\eta_h = \frac{2\pi n T_m}{E(\rho Q)_1}$$

When the guarantees are referred to the prototype performances, the hydraulic efficiency and mechanical power of runner of the prototype shall be determined from the corresponding quantities of the model by applying a transposition formula, as explained in 8.6.2.3. The mechanical losses of the prototype shall then be taken into account to determine the mechanical power of the machine P (power delivered by the turbine shaft) and the total efficiency of the hydraulic machine $\eta = \eta_h \times \eta_m$, more simply called "efficiency" in this document (see 3.4.10.3).

8.4 Hydraulic similitude

8.4.1 Theoretical basic requirements and similitude numbers

In theory, to achieve hydrodynamic similitude between two hydraulic turbomachines A and B (where A can stand for model and B for prototype), the following conditions should be met:

- geometric similitude between machines A and B;
- kinematic similitude between machines A and B (identical ratios of corresponding flow velocity components at any homologous point);
- dynamic similitude between machines A and B (identical ratios of the various forces acting between the fluid and the components of each machine).

These ratios are defined by dimensionless terms and are identified by similitude numbers.

In the context of this document, the major similitude numbers are summarized in Table 7:

Table 7 – Similitude numbers

Similitude number (symbol)	Ratio of forces	General definition	Definition used in this document
Reynolds (Re)	$\frac{\text{inertia}}{\text{viscosity}}$	$\frac{vL}{\nu}$	$Re = \frac{uD}{\nu}$ or $\frac{uB}{\nu}$ (see 3.4.12.1)
Froude (Fr)	$\frac{\text{inertia}}{\text{gravity}}$	$\frac{v}{(gL)^{1/2}}$	$Fr = \left[\frac{E}{gD} \right]^{1/2}$ or $\left[\frac{E}{gB} \right]^{1/2}$ (see 3.4.12.2)
Weber (We)	$\frac{\text{inertia}}{\text{surface tension}}$	$\frac{\rho Lv^2}{\sigma^*}$	Identical to general definition (see 3.4.12.3)

Usually, it is impossible to choose the test conditions to satisfy the various similitude numbers simultaneously. Therefore, the similitude condition to be considered should be the one with the greatest influence on the results.

In most model tests, it is not possible to achieve the corresponding prototype similitude number. Therefore, corrections shall be applied to the model results when they are transformed to prototype conditions.

8.4.2 Conditions for hydraulic similitude as used in this document

From the above basic requirements, it can be derived that two machines A and B are operated under hydraulically similar operating conditions if the following conditions are met:

- the requirements of geometric similarity between A and B stipulated in 5.1.3.4 and in 5.2 are fulfilled;
- the ratios of corresponding flow velocity components at any homologous point of both machines are identical, making the corresponding velocity triangles at the runner (defined by the absolute, circumferential and relative velocity components) geometrically similar.

Consequently, both machines have, at corresponding operating points, identical discharge factors and energy coefficients or speed factors (see 3.4.13):

- same discharge factors $(Q_{EB})_A = (Q_{EB})_B$
- and same energy coefficient $(E_{nD})_A = (E_{nD})_B$ or same speed factor $(n_{ED})_A = (n_{ED})_B$

The equality of these coefficients and factors characterizes the hydraulic similitude of both machines. This is important with respect to "hydraulic" characteristics and/or data that are guaranteed or specified in accordance with Clause 5.

Other similitude conditions that are important for "mechanical" aspects (e.g. hydroelasticity etc.) are not covered by this document.

8.4.3 Similitude requirements for various types of model tests

Table 8 gives an overview of similitude conditions that should be observed when performing tests on a model whose results are related to a prototype machine.

Independent of the type of test, as a minimum, the similitude conditions for discharge, specific hydraulic energy or speed shall be fulfilled in accordance with 8.4.2b), in order to achieve hydraulic similitude between model and prototype.

The following subclauses 8.4.4, 8.4.5 and 8.4.6 give detailed information on the influence of the various similitude conditions covered by this document.

Table 8 – Similitude requirements for various types of model tests

Type of test	Similitude conditions to be observed and related comments
Performance test	It is recommended that Fr similitude be respected for performance tests (see 8.4.5).
	Efficiency, power:
	The influences of Fr , We and Re are considered according to 8.6.2.3 and Annex G.
	Discharge, specific hydraulic energy: It is assumed that Fr , We and Re have no influence
Runaway test	It is assumed that only Fr similitude is recommended
Additional tests	It is assumed that Fr , We , Re have no influence

8.4.4 Reynolds similitude

The influence of the Reynolds number on hydraulic efficiency is considered in accordance with Annex G and 8.6.2.3.

8.4.5 Froude similitude

Because of two-phase flow in the turbine housing, the efficiency of Pelton turbines can be strongly influenced by the Froude number. Therefore, it is recommended, for Pelton turbine model tests, to choose a specific hydraulic energy that satisfies the Froude similitude.

8.4.6 Other similitude conditions - Weber number

Although this document does not consider any influence of the Weber number (except in Annex G), it can be stated that the Weber number becomes important for two-phase flow as it occurs in the housing of Pelton turbines. The degree of atomization of droplets, which influences the windage losses and/or the jet disturbance, is dependent on the Weber number.

For model tests of impulse turbines, it is usually not possible to respect Froude and Weber similitude simultaneously. Froude similitude is maintained in most cases, because the effects depending on Froude generally dominate over Weber similitude effects.

8.5 Test conditions

8.5.1 Determination of test conditions

The test conditions to be chosen for the different types of tests are dependent upon:

- capacity of test installation and its instrumentation;
- size and mechanical design of the model machine;
- guaranteed and/or specified operating range.

If guarantees or specified data are given for the prototype, the required model test parameters can be calculated from hydraulic similitude, defined in 8.4.2 b), by applying the formulae in 8.6.2.4. It is essential that the following aspects are taken into account:

- the permitted minimum values of Table 9 shall be satisfied;
- the mechanical limitations due to model design shall be checked;
- the limitations due to design and operation of the test rig and available instrumentation shall be considered.

Models used for comparative tests shall be the same size and tested at approximatively the same specific hydraulic energy defined by contract (see 5.1.3.2).

For performance tests, it is sometimes recommended to choose a test specific hydraulic energy higher than the minimum value to achieve a higher Froude number, which is closer to that of the prototype, in order to reduce the relative inaccuracies in measurement.

From the above considerations, the absolute range of values of the following model quantities, i.e. the test conditions for each type of test, can be defined:

- speed or specific hydraulic energy;
- discharge;
- power and/or torque.

8.5.2 Minimum values for model size and test conditions to be fulfilled

In order to achieve good hydraulic similarity between model and prototype, it is necessary to define minimum values for model size, Reynolds number, and test specific hydraulic energy as given in Table 9, in addition to the requirements for geometrical similarity and surface roughness of model and prototype stipulated in 5.1.3.4 and 5.2.

These minimum values shall be satisfied in order to:

- ensure the required dimensional accuracy, with normal manufacturing techniques;
- obtain test results with sufficient measurement accuracy, independent of inadmissible test conditions;
- reduce scale effects between model and prototype, by testing at appropriate Froude number.

The various minima are independent of each other and shall all be satisfied. Normally, models should be as large as practicable, but never less than the values stated.

Table 9 – Minimum values for model size and test parameters

Parameter	Value
Reynolds number Re (-)	2×10^6
Specific hydraulic energy E ($J \cdot kg^{-1}$)	500
Bucket width B (m)	0,08

8.5.3 Stability and fluctuations during measurements

Fluctuations in the various measured quantities cannot be avoided. Such fluctuations can be of periodic or random nature within a large frequency range. They can be generated by elements of the test rig (e.g. booster pump, throttling devices, control system for low pressure) and/or by the model machine. During model tests, it is essential that at all operating points, repeatable steady-state operating conditions are achieved, especially within the range of guaranteed operation of the prototype.

Before and during the measurement of a point, the operating stability of the test rig shall be such that repeated measurements of the same operating point are within the agreed uncertainties due to random errors of the various measured quantities. This also means that drifting effects of discharge, specific hydraulic energy and speed shall remain small. Drifting effects usually introduce systematic errors, and shall therefore be eliminated.

Fluctuations during the measurement of a point can be checked by means of the standard deviation of a measured quantity or the derived uncertainty due to random errors if the test rig is equipped with a suitable data acquisition system. If the results are affected by fluctuations, linear hydraulic damping (see 7.2.3.4) can be applied, to adjust the filtering of electric signals (see 6.1.4.4.2), to adjust the test conditions or to apply other means to eliminate these effects. However, such adjustments shall not bias the measured quantity.

8.5.4 Adjustment of the operating point

When the operating points to be measured are defined by specified dimensionless values (speed factor, discharge factor or other dimensionless terms) corresponding to the contractually specified ones, it is necessary to adjust the test conditions so that they are as close as possible to the specified data. Deviations between measured and specified dimensionless values should not exceed $\pm 0,5$ % for speed, discharge or power coefficient or factor.

8.6 Computation and presentation of test results

8.6.1 General

The main hydraulic performance guarantees verifiable by model test are: power, discharge and/or specific hydraulic energy, efficiency, steady-state runaway speed and/or discharge, see 9.2.

The model test results shall be converted into quantities directly comparable with the data specified or guaranteed in the contract. The procedures to calculate these quantities are described in the following subclauses. However, specific conditions shall be fulfilled.

When it is agreed in the contract, the scale effect should be taken into account in accordance with Annex G or by any other method mutually agreed.

Annex C provides an abstract of the test and calculation procedure.

For the hydraulic performance test of a machine, Table 10 shows:

- the geometric parameters;
- the independent hydraulic variables;
- the dependent hydraulic variables.

Table 10 – Variables defining the operating point of a machine

Geometrical parameter	s
Independent hydraulic variables	E_{nD}, Q_{EB} or n_{ED}, Q_{EB}
Dependent hydraulic variables	η_h P_{ED}
For runaway tests $\eta_h = 0$ and $P_{ED} = 0$ only one of the quantities E_{nD}, Q_{EB} is an independent variable.	

Example of performance diagram for a Pelton turbine is given in Figure 36.

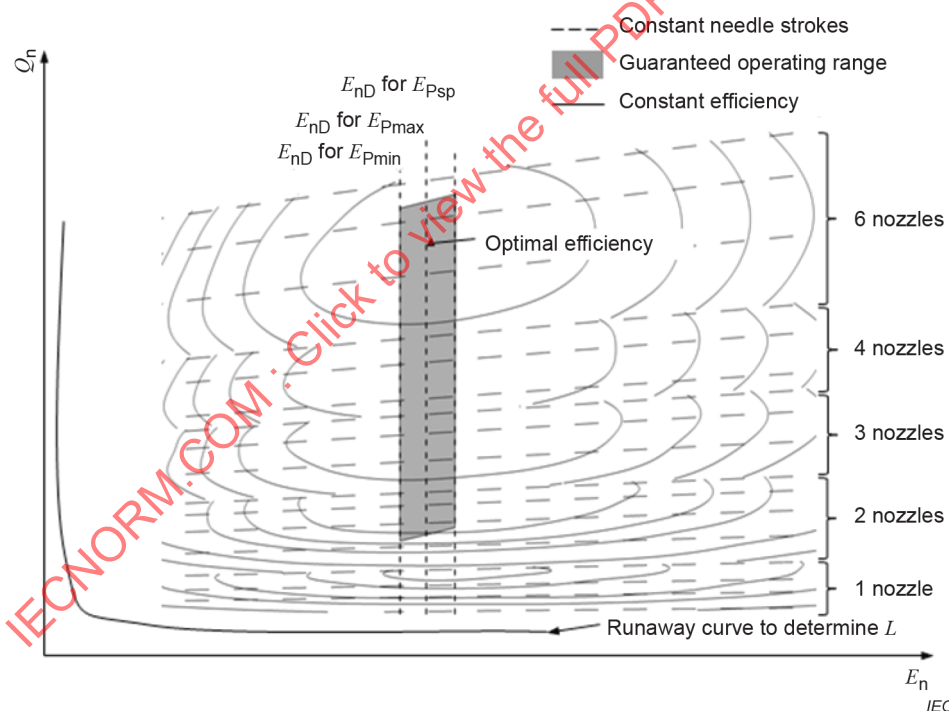


**Figure 36 – Pelton model turbine: performance hill diagram
(example for a six-nozzle machine)**

8.6.2 Power, discharge and efficiency in the guarantee range

8.6.2.1 Computation of model performance

For each point, a set of one or more readings and/or recordings of the physical quantities used to determine the hydraulic performance of the model (see Clause 7) is made.

The average values of E_M , Q_{1M} , n_M and P_{mM} are then computed (see 6.1); the formulae shown in 8.3.3 enable the hydraulic efficiency η_{hM} of the model to be calculated. The Reynolds number Re_M is computed by the formula in 3.4.12.1.

Experience of different manufacturers has shown scale effects on Pelton turbines to be primarily influenced by Froude, Reynolds and Weber numbers. A procedure for taking these effects into account is proposed in Annex G and may be used by mutual agreement.

8.6.2.2 Presentation of model performance

As the model efficiency guarantees for a specified value of Fr_{Msp} are usually stated as a function of the prototype data E_P and Q_{1P} (or P_{mP}) for Pelton turbines, the model performance data are converted to the prototype data using the relevant formulae (see 8.6.2.4).

The guaranteed efficiency is usually given for one specified speed and one or more specified specific hydraulic energies. As a result, it is necessary to obtain from the model test data a sufficient number of points or curves to cover the guarantees.

If the tests are carried out by choosing energy coefficients or speed factors nearly equal to the specified ones, it is possible to obtain a set of points or curves $\eta_{hM}(Q_{EB})$ to be used for comparison with guarantees (for the determination of the best smooth curves, see for instance Annex E). As it is not possible to test at exactly constant speed factor, the following procedure is recommended:

- measurement of a number of points sufficient to draw the three-dimensional surface (hill diagram) of: $\eta_{hM}(E_{nD}, Q_{EB})$ or $\eta_{hM}(n_{ED}, Q_{ED})$;
- sectionalize the three-dimensional surface representing the hydraulic efficiency at the energy coefficients or speed factors specified. Figure 37 shows the three-dimensional representative surface η_{hM} drawn versus energy and discharge coefficients and its section at the specified values of $E_{nD} = E_{nDsp}$.

The determination of the three-dimensional surface (hill diagram) is necessary if the guarantees are based on annual energy production.

For each E_{nDsp} (or n_{EDsp}), the η_{hM} values obtained following one of the above procedures, enable the mechanical runner power factor P_{ED} curve to be calculated, for comparison with model guarantees.

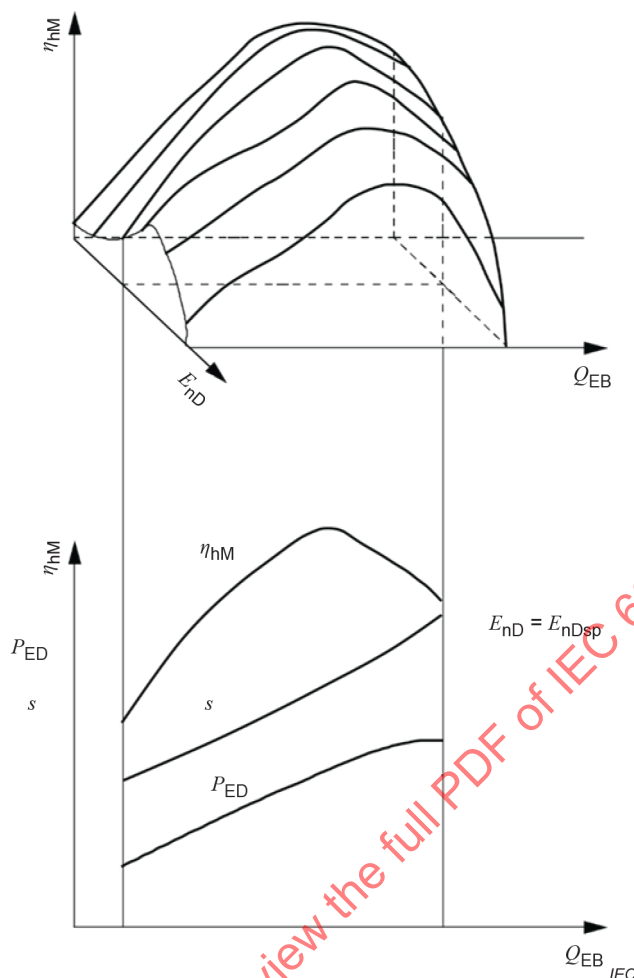


Figure 37 – Three-dimensional surface of hydraulic efficiency and curves of performance at E_{nD} constant

8.6.2.3 Computation of prototype performance

For a Pelton turbine, if it has been contractually agreed to take into account a scale effect on efficiency, $(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow P}$ may be calculated in accordance with Annex G.

Other data concerning the main hydraulic performance of the prototype (discharge, specific hydraulic energy and mechanical runner power) are obtained from the formulae of 8.6.2.4. The prototype mechanical runner power is computed taking into account the scale effect on the hydraulic efficiency.

The procedure of drawing⁷ the curves of prototype performance, and of determining the curves to be compared with the prototype guarantees is the same as the one established for guarantees given on the model (see 8.6.2.2).

⁷ For the determination of the best smooth curves, see for instance Annex E.

8.6.2.4 Formulae for computation of prototype performance within the guaranteed efficiency range

The measurements carried out during model tests make it possible to calculate, for each point, the discharge Q_{1P} , the specific hydraulic energy E_P and the mechanical runner power P_{mP} of the geometrically similar prototype operating in hydraulically similar conditions (see 8.4.2) using the formulae listed below.

Since available data for the scaling of discharge and specific hydraulic energy do not show consistent trends, it has been assumed that only efficiency and power (due to efficiency increase) are influenced by scale effects.

$$\eta_{hP} = \eta_{hM} + (\Delta\eta_h)_{M \rightarrow P}$$

where

$(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow P}$ may be calculated in accordance with Annex G.

Two procedures for the computation of prototype performance are possible:

a) Direct calculation from model measured data:

$$Q_{1P} = Q_{1M} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{0.5} = Q_{1M} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^3 \frac{\eta_P}{\eta_M}$$

$$E_P = E_M \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{\eta_P}{\eta_M} \right)^2$$

$$P_{mP} = \rho_{1P} Q_{1P} E_P \eta_{hP} = P_{mM} \frac{\rho_{1P}}{\rho_{1M}} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{1.5} \frac{\eta_{hP}}{\eta_{hM}} = P_{mM} \frac{\rho_{1P}}{\rho_{1M}} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^5 \left(\frac{\eta_P}{\eta_M} \right)^3 \frac{\eta_{hP}}{\eta_{hM}}$$

where

$$P_{mM} = \rho_{1M} Q_{1M} E_M \eta_{hM}$$

b) Calculation from the dimensionless factors (or coefficients) previously computed from model measured data:

$$Q_{1P} = Q_{EB} B_P^2 E_P^{0.5}$$

$$E_P = \frac{1}{\eta_{ED}^2} D_P^2 \eta_P^2 = E_{nD} D_P^2 \eta_P^2$$

$$P_{mP} = P_{ED} \rho_{1P} D_P^2 E_P^{1.5} \frac{\eta_{hP}}{\eta_{hM}}$$

The formulae apply under the following conditions:

- if no scale effect is taken into account, it is assumed that $\eta_{hP} = \eta_{hM}$;
- if it is contractually agreed to take a scale effect into account, then $(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow P}$ may be calculated according to Annex G.

8.6.3 Computation of steady-state runaway speed and discharge

8.6.3.1 Determination of the model steady-state runaway curves

The Reynolds number scale effect is assumed zero in the range near to the runaway operation.

For each point a set of readings and/or recordings of physical quantities used to determine the model steady-state runaway speed and discharge is recorded, with $T_{mM} = 0$ (see 5.3.3.6).

The average values of E_M , Q_{1M} and n_M are then computed; $n_{ED,R}$ and $Q_{EB,R}$ (or $E_{nD,R}$ and $Q_{EB,R}$) are finally derived using the formulae of 3.4.13.

The runaway curve is drawn for different openings s (see Figure 38) to obtain the maximum steady-state runaway speed $n_{ED,Rmax}$ and discharge $Q_{EB,Rmax}$.

The runaway tests shall be carried out by varying the needle stroke over all the guaranteed range.

For Pelton turbines, the maximum runaway speed is determined taking into account the influence of the number of nozzles (see Figure 38).

If, during the tests, it is not possible to reach $T_{mM} = 0$, the runaway conditions can be determined by extrapolation (see Figure 39).

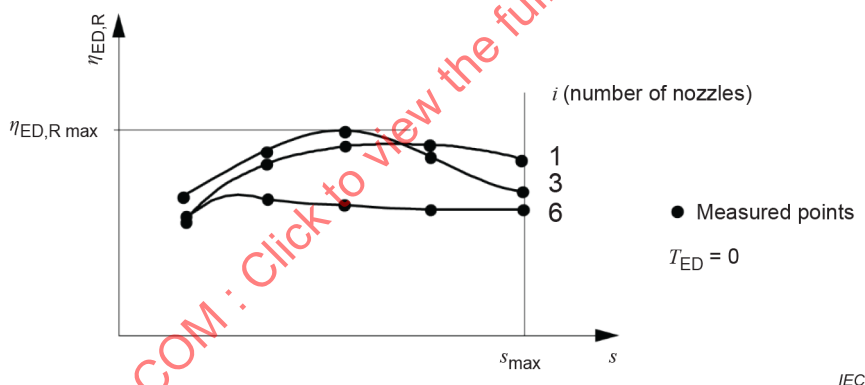


Figure 38 – Runaway curves for a six-nozzle Pelton turbine

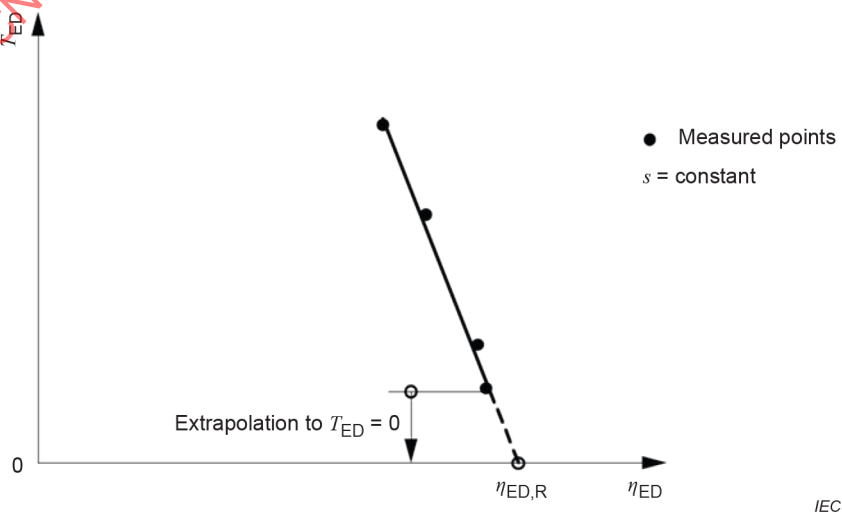


Figure 39 – Runaway speed determined by extrapolation

8.6.3.2 Computation of the prototype steady-state runaway curves

If runaway guarantees are given for the prototype, no scale effect is usually considered: this means that $P_{ED,M} = P_{ED,P}$, in the range near to the runaway point. Unless otherwise agreed, the friction losses of the unit thrust bearing, guide bearings and shaft seal and the mechanical and windage losses of the electrical machine are taken into account, as described in Annex D.

8.6.3.3 Formulae for computation of prototype runaway characteristic

Two procedures are possible:

a) Direct calculation from model measured data:

$$\eta_{R,P} = \eta_{R,M} \left(\frac{D_M}{D_P} \right) \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{0,5}$$

$$Q_{1,RP} = Q_{1,RM} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{0,5}$$

The formula

$$P_{mP} = P_{mM} \frac{\rho_{1P}}{\rho_{1M}} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{1,5}$$

is used to draw a curve $P_{mP}(n_P)$ necessary to take into account the bearings and shaft seal friction losses and the windage losses (see Annex D).

b) Calculation from the dimensionless factors (or coefficients) previously computed from model measured data:

$$\eta_{R,P} = \eta_{ED,R} \frac{E_P^{0,5}}{D_P}$$

$$Q_{1R,P} = Q_{EB,R} B_P^2 E_P^{0,5}$$

The formula

$$P_{mP} = P_{ED} \rho_{1P} D_P^2 E_P^{1,5}$$

is used to draw a curve $P_{mP}(n_P)$ necessary to take into account the bearings and shaft seal friction losses and the windage losses (see Annex D).

9 Nature and extent of guarantees related to hydraulic performance

9.1 General

9.1.1 Design data and coordination

The purchaser shall be responsible for specifying the data on which guarantees are based including, for example, reference sections, water levels, specific hydraulic energies (see 3.4.7.1), and specific hydraulic energy losses. The purchaser is also responsible for coordinating efforts to determine interactions between the waterways and the electrical and mechanical parts of the machine.

The purchaser shall arrange for the machine supplier to be provided with data, accurate and sufficient in detail, to cover the following:

- operating water levels in all reservoirs;
- hydraulic losses of each part of the water conduit from intake to outlet;
- design drawings of water conduits associated with the hydraulic machine including valves and gates;
- any information relevant to the water flow in the conduit, such as any results of model tests of the conduits;
- in the case of rehabilitation of existing machines, particular attention shall be paid to the limitations imposed by the existing equipment (for example needle stroke, surface roughness, generator limitations, etc.).

Attention shall be paid to flow conditions at the model inlet and outlet (see 5.1.2.4 and 5.1.3.3). In most cases, it will be sufficient to extend the model just beyond the high and low pressure reference sections. These sections shall be included for the model tests in order to comply with this document. If the prototype installation is such that there is reason to believe that the total flow pattern through the waterways is not fully represented by the model, the contract shall specify the steps to be taken, which may include specifying the extent of the water passages to be modelled. In some other cases, the validity of the approach conditions shall have been verified by the purchaser through the test of a partial model of the plant prior to the test of the model machine.

9.1.2 Definition of the hydraulic performance guarantees

A contract for prototype machines shall contain, as a minimum, guarantees covering power, discharge and/or specific hydraulic energy, efficiency, maximum momentary overspeed and maximum/minimum momentary pressure and maximum steady-state runaway speed, as well as guarantees related to cavitation.

The guarantees shall be given for one or more operating points (see 9.2.2). These points belong to performance curves of the machine, which are usually submitted by the supplier. In some cases (e.g. small hydro), a table can be sufficient.

The current state of the art permits the verification of some of these prototype guarantees by model test (see 9.2), while others cannot be verified by model tests (see 9.3). Moreover, additional data can be obtained from the model as an indication of the expected prototype operation (see 10.4).

9.1.3 Guarantees of correlated quantities

It is recommended that the contract does not fix more than one guarantee for correlated quantities; for example efficiency shall be guaranteed versus either discharge or power, but not both.

9.1.4 Form of guarantees

Either of the following two forms of guarantees may be applied when the performance of a prototype machine is to be accepted on the basis of a model test:

- a) Guarantees for the hydraulic performance of the prototype, computed from model test results with allowance for scale effect in accordance with Annex G or mutually agreed by contract.
- b) Guarantees for the hydraulic performance of the model.

In each case, the similitude requirements of 8.4 shall be met.

9.2 Main hydraulic performance guarantees verifiable by model test

9.2.1 Guaranteed quantities for any machine

9.2.1.1 Power

The term power usually refers to the mechanical power of the runner (see 3.4.9.3). When the mechanical power of the machine (see 3.4.9.2) is guaranteed for the prototype, the mechanical power losses (see 3.4.9.4) are to be taken into account.

9.2.1.2 Discharge and/or specific hydraulic energy

This refers either to the discharge at the reference section (see 3.4.5.4), obtained when operating under specified specific hydraulic energies, or to the specific hydraulic energy obtained when operating with specified discharges.

9.2.1.3 Efficiency

The term efficiency refers to the hydraulic efficiency (see 3.4.10.1) unless otherwise specified. When the prototype efficiency (see 3.4.10.3) is guaranteed, the mechanical power losses (see 3.4.9.4) or the mechanical efficiency (see 3.4.10.2) is to be taken into account.

9.2.1.4 Steady-state runaway speed and/or discharge

A guarantee for maximum steady-state runaway speed (see 3.4.5.11) is required.

9.2.2 Specific application

Guarantee	Criteria
Power	Power to be reached at one or more specified specific hydraulic energies
Discharge	Discharge to be reached at one or more specified specific hydraulic energies
Efficiency	Guarantees can be applicable for one or more specified specific hydraulic energies as follows: – at one or more specified powers or discharges; - or – as weighted average efficiency^{a)} over a specified range of powers or discharges
Runaway speed	Guaranteed steady-state runaway speed not to be exceeded when operating under maximum or any other specified specific hydraulic energy.
^{a)} Weighted efficiencies and a series of individual efficiencies shall not be guaranteed simultaneously.	

9.3 Guarantees not verifiable by model test

9.3.1 Guarantees on cavitation erosion

The amount of cavitation pitting is to be guaranteed for the prototype only. Evaluation of this guarantee on the prototype should be carried out in accordance with the recommendations of the IEC 60609 series.

9.3.2 Guarantees on maximum momentary overspeed and maximum momentary pressure rise

Momentary overspeed (including momentary runaway speed) and pressure depend primarily upon water conduit geometry (penstock length, surge tank, etc.), the inertia of the rotating part of the unit and the operating law of the nozzles. They can therefore not be determined directly by a dynamic test on the model which does not reproduce either the full extent of the applicable waterways, the inertia of the unit or the characteristics of the speed governor. Nevertheless, the steady-state model test data, transferred to the prototype, provide values enabling calculation of the transient phenomena with sufficient accuracy.

9.3.3 Guarantees covering noise and vibration

The determination of the prototype noise and vibration by model tests lies outside the scope of this document. This document should be used only as a guide for the modelling of the hydraulic sources of these phenomena (i.e. through determination of the pressure fluctuations or other dynamic loads).

9.3.4 Measurements not covered by this document

There are certain model and prototype measurements that are not covered in this document. Amongst them are axial thrust and pressure fluctuations which do not apply to Pelton model measurements.

9.4 Comparison with guarantees

9.4.1 General

It is recommended that the test results, calculated in accordance with 8.6, are compared with guarantees using the methods of presentation and analysis described below, taking into account the total uncertainty bandwidth (see 9.4.2) and the contractual limits (see 9.4.3).

For simplicity's sake, only prototype power, discharge and/or specific hydraulic energy, hydraulic efficiency and steady-state runaway speed and discharge are considered hereafter (see 9.2).

Comparison with guarantees given on the model is made directly using the same procedures.

It is recommended that hydraulic efficiency is presented versus discharge and not versus power.

9.4.2 Interpolation curve and total uncertainty bandwidth

Different methods and criteria can be used to draw the interpolation curve ranging from the manual to the more sophisticated ones (one of the possible methods of drawing is briefly described in Annex E). The final choice of the interpolation method shall be clearly defined and agreed between the parties.

Taking into account the total uncertainties calculated per 6.3.2, each measured point can be represented on a diagram by an ellipse. The semi-axes of this ellipse represent the total uncertainty, at a confidence level of 95 %, in the two quantities chosen as coordinates of the diagram. Any point within this ellipse is equally valid.

An uncertainty band corresponding to the upper and lower envelopes of these ellipses is superimposed on the curve drawn through the test points (interpolation curve). All the points within this band are equally valid and hence this band constitutes an acceptable bandwidth for the comparison with the guarantees.

The ellipses need only be used when evaluating the guaranteed points or whenever the result of the comparison is not sufficiently clear (see Figure 41, details X and Y). In most other cases, it is possible to simplify the procedure and to determine the total uncertainty bandwidth by reducing the ellipses to their principal axis when for example the error on the abscissa can be neglected (see Figure 42), or the measured curve across the guaranteed point is almost horizontal, or has only a small gradient.

If the guarantees are given by points, it is recommended that the measured points be selected as near as possible to the guaranteed points: Figure 40 shows an example concerning the hydraulic efficiency.

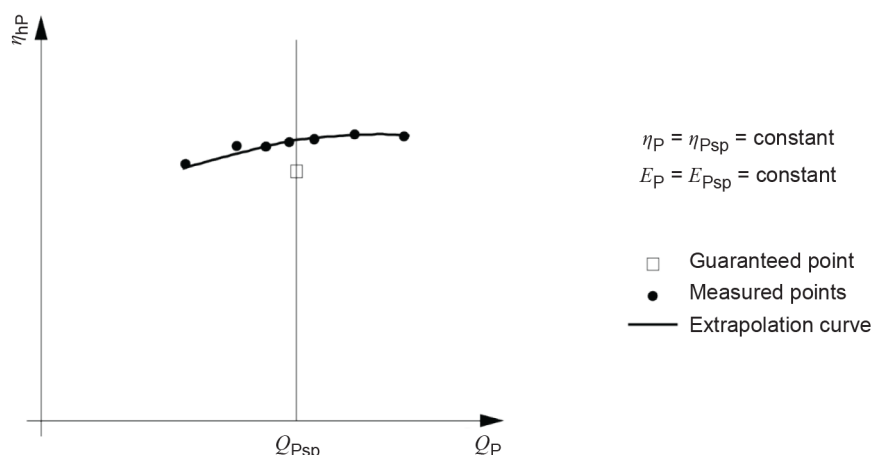


Figure 40 – Measured hydraulic efficiency compared to guarantee point

9.4.3 Power, discharge and/or specific hydraulic energy and efficiency in the guarantee range

If the hydraulic efficiency guarantee is given at one or more specified powers or discharges, it is met if, at the specified speed and specified specific hydraulic energy, the guaranteed single values lie below the upper limit of the total uncertainty bandwidth at the specified powers or discharges.

If the hydraulic efficiency guarantee is given as a weighted or arithmetic average efficiency, it is met if, at the specified speed and specified specific hydraulic energy, the guaranteed average efficiency is less than the average efficiency calculated at the same specified discharges (or power) using the upper limit of the total uncertainty bandwidth.

In case of guarantees given at different E_{Psp} , a diagram similar to Figure 41 shall be drawn for each specified specific hydraulic energy.

Figure 41 gives an example of comparison with guarantees given at four operating points, at a specified E_P . It shows that:

- the hydraulic efficiency guarantee is not met at D (see detail X);
- the mechanical runner power guarantee is not met because the guaranteed power is not reached even if the upper limit of the uncertainty bandwidth is taken into account (see detail Y).

The curve $s(Q_P)$ in Figure 41 is drawn to determine:

- the maximum opening s_{max} for the runaway test (see Figure 42);
- if a sufficient margin exists between the guaranteed power and the mechanical runner power saturation.

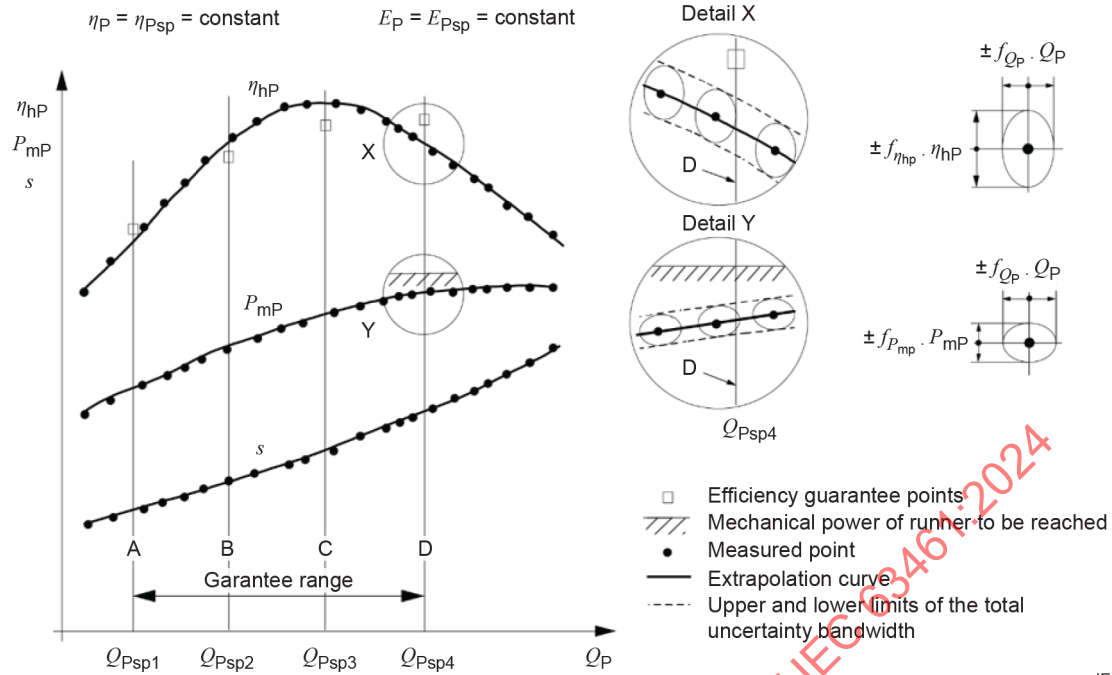


Figure 41 – Comparison between guarantees and measurements

9.4.4 Prototype mechanical losses

If the prototype power P_P is guaranteed, the prototype mechanical losses shall be taken into account (see 9.2.1.1).

If the prototype efficiency η_P is guaranteed, the following formula applies (see 3.4.10.3):

$$\eta_P = \eta_{hP} \times \eta_{mP}$$

9.4.5 Runaway speed and discharge

The shape of runaway for Pelton turbine is covered in 8.6.

The example of Figure 42 shows the prototype steady-state runaway speed curve, calculated from the measured model speed factors, against needle opening.

In this example, the guarantees of maximum steady-state runaway speed and discharge are met as shown in details X and Y: at opening values less than s_{max} , the lower limit of the uncertainty bandwidth is lower than the value not to be exceeded.

Unless otherwise agreed, the mechanical and windage losses of the motor/generator and the mechanical losses of the hydraulic machine (see Annex D) are taken into account.

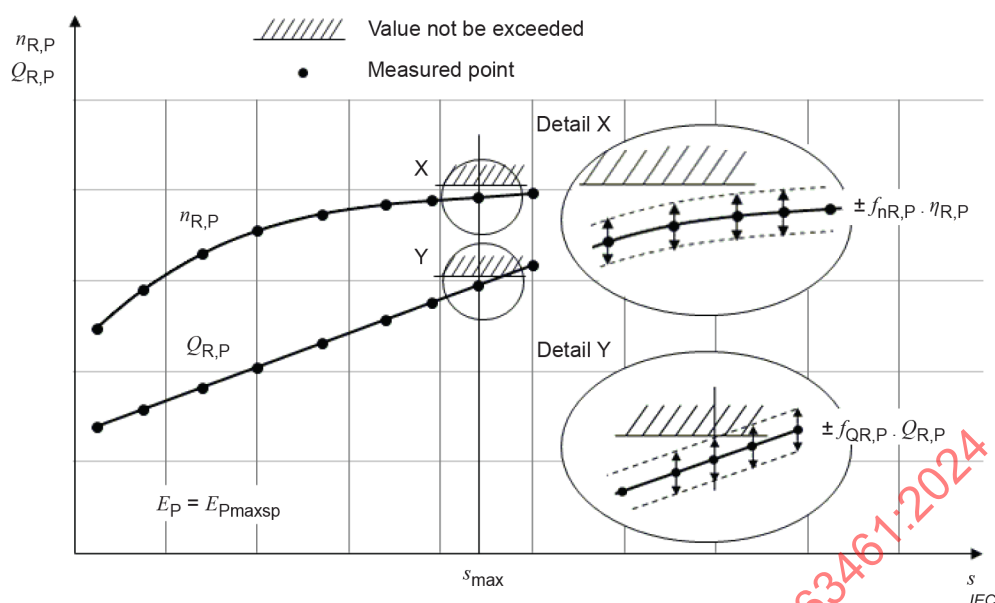


Figure 42 – Pelton turbine runaway speed and discharge curves: comparison between guarantees and measurements

9.4.6 Penalty and premium

It is recommended that the contract should state in detail the method of calculating penalties and/or premium from the test results.

To determine the penalty on efficiency, the guarantee shall be compared with the upper limit curve of the total uncertainty band.

To determine the premium on efficiency, the guarantee shall be compared with the lower limit curve of the total uncertainty band.

10 Additional performance data – Methods of measurement and results

10.1 Additional data measurement

10.1.1 General

The so called "additional data" (torque, forces, etc.) provide information for the design and operation of the hydraulic machine within the hydroelectric power plant. Therefore, additional types of measurements are needed, which can be specified.

Each operating point of a hydraulic machine is characterized by a variety of mechanical and hydraulic quantities (usually of oscillating nature) which occur during both steady-state and transient operations. The model is always operated in steady-state conditions. In general, it is not possible to simulate on the model the prototype transient operating sequences, the data for which can only be derived from a series of steady-state operations.

Subclause 6.2 describes requirements for data acquisition and processing in addition to those given in 6.1.

It is often unnecessary to measure some of the additional data on the model if these values can be predicted with sufficient accuracy based on data from similar hydraulic machines (e.g. needle force, deflector torque, etc.). The measurements of additional data shall be defined by the technical programme (see 5.3.3.2).

For the mechanical design of the prototype, hydraulic loads acting on various components of the prototype machine can be derived from model test data scaled using appropriate transposition laws. Subclause 10.2 describe the methods and the test conditions for deriving such hydraulic loads with their mean and dynamic components.

Subclause 10.3 deals with the influence of tail water level.

Start up, shut down and/or any change of operation modes will lead to transient operation of the machine far from the "normal" operating range. Therefore, in certain cases it is required to explore this extended operating range with respect to the relevant hydraulic and mechanical quantities. Subclause 10.4 deals with measurements of the hydraulic characteristics in the extended operating range.

Finally, Subclause 10.5 describes how to investigate during model tests the feasibility of index tests on the prototype and Subclause 10.6 describes the estimation of prototype discharge based nozzle flow characteristic curves obtained during model test.

10.1.2 Test conditions and test procedures

The additional measurements are usually performed with the same model machine on the same test installation and require the same instrumentation as used for the main hydraulic performance tests according to Clause 7 to Clause 9. It shall be checked if the same test conditions can be applied as during the main hydraulic performance tests or shall be adapted. In any case, disturbing effects due to vibrations, resonance, mechanical deformations, etc., or defects of the additional measuring equipment shall be minimized. Possible exceptions to the requirements of Clause 7 and Clause 8, if any, are dealt with in the relevant subclauses of Clause 10.

Instrumentation requirements and the measurement of fluctuating quantities are given in the corresponding subclauses of Clause 10. Supplementary recommendations for measurement of these additional data can be found in existing IEC and ISO standards (such as IEC 60994).

Depending on the measuring method, the scope of various test series and the admissible and required test conditions, the test procedure and the test programme can be defined. The measurement of various types of additional data can be combined with each other and/or with the measurement of the main hydraulic performance.

The same procedures with respect to calibration, preliminary and acceptance tests, check of zero readings, etc. as described in 5.3 are also applicable to measurements of additional data.

The test conditions and basic analysis methods shall be agreed upon prior to the tests.

10.1.3 Uncertainty in measurements

The total uncertainty in the measurements of additional data is generally higher than the uncertainty in the measurement of the main hydraulic performance quantities, for the following reasons:

- a) the off-design operating range in which the quantity is measured;
- b) the unsteady nature of the measured quantities;
- c) the limitation of the available instrumentation and calibration procedures.

The measuring methods shall be selected such that the uncertainty corresponds to the mutually agreed accuracy for any given purpose. In many cases, figures for uncertainties should be given in physical units (Pa, N, N·m, ...).

The individual aspects of uncertainties are described in the relevant subclauses.

10.1.4 Model to prototype conversion

Prototype values can be calculated by converting the model test data according to the general similarity laws. The appropriate conversion procedures are described in the following subclauses. It is common practice to transpose the results from model to prototype using the appropriate dimensionless terms.

However, it shall first be checked whether hydraulic and mechanical similarity laws are sufficiently established for the particular quantity. If not, the conversion shall consider the dynamic-structural aspects of the prototype machine within the entire hydroelectric system, including such factors as flow pattern at entrance and exit, resonance, external excitation, etc.

Factors in the model test facility, for example the following, which could affect the test results, should be eliminated to the extent possible:

- a) influences due to flow regimes;
- b) influences of mechanical structures.

10.2 Hydraulic loads on control components

10.2.1 General

10.2.1.1 Type of control components

In order to control power or discharge, the control elements of Pelton turbines are the nozzle(s) with adjustable needle(s) and deflector(s).

Sometimes gates or valves can be used as control components, but they are not considered in the following.

10.2.1.2 Purpose of load measurements

The purpose of such tests is to check or determine by means of model measurements the hydraulic loads, i.e. forces and torques acting on the control components of a machine. The model is always operated at steady-state operating conditions (see 10.1.1).

Such model results (absolute or dimensionless values) can be used to:

- a) check the extreme values of hydraulic loads which are relevant for the prototype design (mean values and fluctuating components);
- b) establish at which operating conditions the fluctuating amount of a hydraulic load becomes important and which are the relevant excitation frequencies;
- c) check at which operating conditions the hydraulic torque has opening or closing tendency;
- d) produce input data for calculation of prototype loads during transient operating conditions.

10.2.1.3 Design of control components for hydraulic loads measurements

The model components prepared for hydraulic load measurements are often of special design. If strain gauges are used, the deformation of the instrumented component under hydraulic load shall be such that sufficient strain is produced. This can be achieved by an appropriate design; however, the impact on the mechanical safety and the natural frequency of the measuring component shall be checked. It is also important to check how much the model measurements will be affected by friction forces or torques. If friction effects are not negligible, their effects shall be eliminated from the final model test results because their relative value is different from the prototype.

As a consequence of the design, it can be necessary to perform such tests at a reduced test-specific hydraulic energy, in order to avoid inadmissible hydraulic loads or resonance conditions. Therefore, it is important to determine the natural frequency in water of such measuring components.

Sometimes it is preferable to prepare additional measuring components, which are only installed for hydraulic load tests, so that the main hydraulic performance tests can be done without limitations and without risk of damaging measuring components.

10.2.1.4 Signal processing

The measuring signal from calibration and/or measurement can be recorded manually or automatically. However, for extensive measurements with many test points or many measuring components, automatic data acquisition is recommended. This also facilitates the data-processing and display of tests results.

10.2.2 Pelton needle force and deflector torque

10.2.2.1 General

In most cases, it is not necessary to measure needle forces and deflector torques because either sufficient data are available from model or site tests or the data can be calculated.

10.2.2.2 Definitions

For each operating point, a mean value F_N and/or T_D is determined which can be used to calculate a dimensionless needle force factor $F_{N,EB}$ and/or a dimensionless torque factor $T_{D,EB}$.

Definition of needle force factor (see 3.4.14.7):

$$F_{N,EB} = \frac{F_N}{\rho B^2 E}$$

Definition of deflector torque factor (see 3.4.14.5):

$$T_{D,EB} = \frac{T_D}{\rho D B^2 E}$$

Instead of the bucket width B , the nozzle orifice diameter d (see Figure 12) can be used for definition of the needle force factor $F_{N,Ed}$ and of deflector torque factor $T_{D,Ed}$:

$$F_{N,Ed} = \frac{F_N}{\rho d^2 E}$$

$$T_{D,Ed} = \frac{T_D}{\rho D d^2 E}$$

10.2.2.3 Measuring methods

10.2.2.3.1 General

In multi-jet Pelton turbines, it is sufficient to measure the hydraulic load on only one needle and/or one deflector, because the flow differences between the various nozzles are not significant for these measurements.

If the measuring section is not located in dry air, it is important that a good surface protection against humidity is applied. The electric insulation resistance should be checked periodically.

10.2.2.3.2 Needle force

The hydraulic force acting on the needle can be directly measured by means of a load cell fixed inside the inner servomotor and mechanically connected to the rod end of the needle. It is also possible to extend the needle rod through the distributor such that the load cell can be fixed outside. In addition, the static pressure should be recorded in the nozzle body to consider a possible force resulting from different diameter ratios between nozzle opening and needle rod on model and prototype.

10.2.2.3.3 Deflector torque

The hydraulic torque acting on the deflector can be determined by measuring deformations with strain gauges applied at its supporting structure or adjusting mechanism in the case that no bearing is involved.

10.2.2.4 Calibration

Preferably, the calibration is made with the same measuring arrangement as used for the tests in order to check and/or to consider the friction forces of the bearing and seal system.

To calibrate the load cell installed on the needle rod (see 10.2.2.3.2), it is loaded statically with certified masses.

Provisions shall be made to apply on the deflector known forces or torques using a calibrated load cell or certified masses. In case of a force, it is important to determine its direction and the distance to the pivot (length of the lever arm).

10.2.2.5 Influence of external phenomena

The design of the measuring arrangement shall be such that the force or torque measurement is not significantly affected by friction effects.

In case of horizontal shaft Pelton turbines, deflector torque includes both hydraulic torque and gravitational torque acting on the deflector. The hydraulic torque is obtained from the total measured torque by removing the gravitational torque measured beforehand in air.

10.2.2.6 Checks before and during measurement

Before and after each test series, the measuring signal at standstill (nozzle not completely closed, deflector not touching its stop) shall be recorded and checked. Preliminary tests shall demonstrate that the force factor or torque factor are not dependent on the test-specific hydraulic energy.

10.2.2.7 Test programme

The needle force and the deflector torque mainly depend on their position and on the discharge. There is also an impact of the splashing water in the housing on the deflector torque. The speed factor of the runner has no influence on the needle force and only a small influence on the deflector torque. Needle force and deflector torque can therefore be determined by one test series, where the stroke is varied systematically from closed to fully open position, and at some selected stroke positions the deflector angle is also varied. The test can be performed under reduced specific hydraulic energy.

10.2.2.8 Graphical presentation of results

Usually, the needle force factor is represented as a function of the needle stroke s referred for example to the nozzle orifice diameter: $F_{N,Ed} = f(s/d)$. At closed position of the nozzle, $s = 0$. An example is presented in Figure 43.

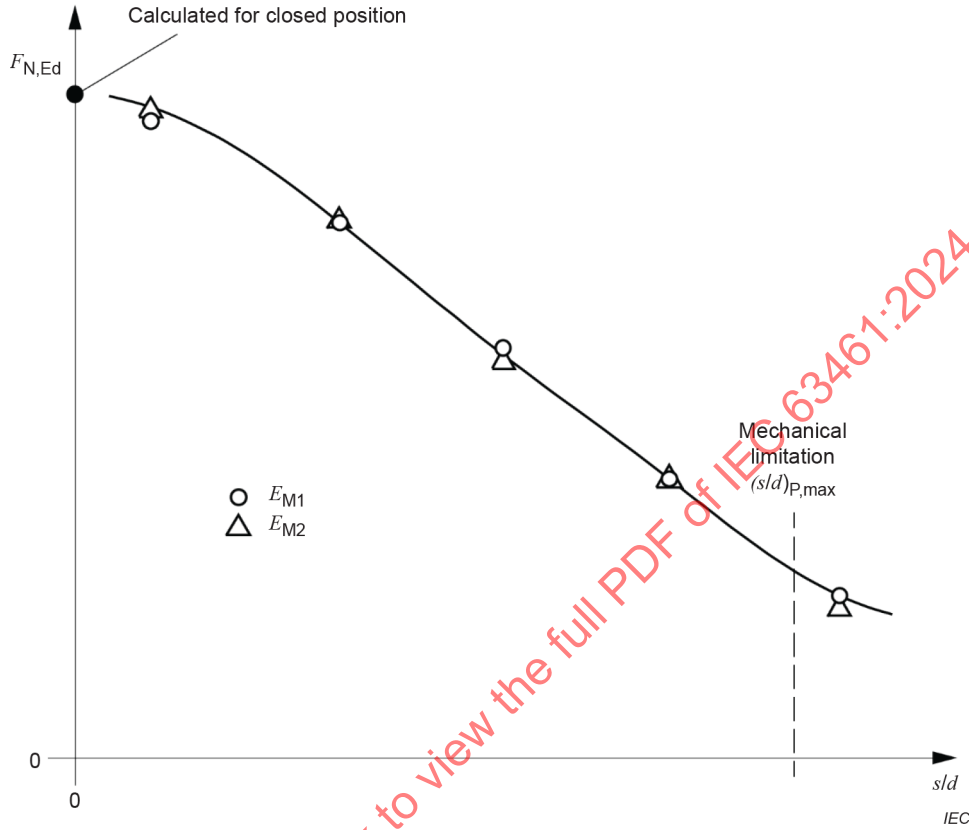


Figure 43 – Pelton needle force factor as a function of relative needle stroke

Usually, the deflector torque factor is represented as a function of the deflector position.

Based on hydraulic similarity conditions, the prototype needle force and/or deflector torque can be calculated using either the force and/or torque factors or the absolute model values.

Calculation of hydraulic prototype needle force:

$$F_{N,P} = F_{N,M} \left(\frac{d_P}{d_M} \right)^2 \frac{E_P \rho_P}{E_M \rho_M} = F_{N,Ed} d_P^2 E_P \rho_P = F_{N,EB} B_P^2 E_P \rho_P$$

If needle rod diameters on model and prototype are non-homologous, a correction shall be applied to get the total force $F_{Ntot,P}$.

Calculation of hydraulic prototype deflector torque:

$$T_{D,P} = T_{D,M} \left(\frac{D_P}{D_M} \right) \left(\frac{d_P}{d_M} \right)^2 \frac{E_P \rho_P}{E_M \rho_M} = T_{D,Ed} D_P d_P^2 E_P \rho_P = T_{D,EB} D_P B_P^2 E_P \rho_P$$

Because there is no impact of the flow in the runner on the needle, the fluctuations of the needle force are negligible. At fully opened position, the deflector is exposed to splashing water from the runner inducing torque fluctuations. At deflecting positions, torque fluctuations are mainly due to splashing water of the deflected jet. Since, in most cases, the hydraulic similarity with respect to the two-phase flow in the housing is not fulfilled, deflector torque fluctuations measured on the model should not be directly transposed to prototype conditions.

10.2.2.9 Uncertainty

The uncertainty in the measurement of model needle force and deflector torque is influenced by the following factors:

- a) hysteresis of the calibration curve of the instrumented components;
- b) repeatability and drift of the zero force or torque point;
- c) influence of any friction effects.

With good measurement conditions, the mean values of the model deflector torque or of the needle force can be determined with an uncertainty of about ± 5 % of the maximum mean values. The uncertainty in corresponding derived prototype values could be about ± 5 % to ± 10 % of the maximum prototype mean value.

10.3 Influence of tail water level

It is recommended to determine the tailwater elevation at which performance is affected. This check is to be done at selected full load operating points, by varying the tailwater level.

10.4 Testing in an extended operating range

10.4.1 General

In addition to the determination of hydraulic characteristics of a machine in a limited range of specific hydraulic energies and discharges, it is also important to know its complete characteristics covering possible operating conditions outside the normal operating range.

As stated in 10.1.1, model tests do not reproduce transient operation of the prototype. However, the obtained data are meaningful and are a necessary input for the calculations of transient phenomena and loads for prototype design. The range between normal operating range and runaway speed can therefore be investigated on the model.

Also, Pelton turbines with geometric angle between two consecutive injectors lower or equal to 72° can be affected by “efficiency cliff”: when the jet velocity is low in comparison to runner peripheral velocity, the efficiency can significantly drop. This generally affects the domain of low head and high output power. It is of interest for the future prototype operation to explore the range of the potential efficiency cliff.

10.4.2 Scope of tests

The main hydraulic quantities to be measured are:

- specific hydraulic energy;
- discharge;
- shaft torque;
- rotational speed.

For the range between normal operating range and runaway speed, the intervals between the measured points can be considerably increased compared to those in the guaranteed range of operation. However, it is recommended to extend the testing range to the minimum and maximum possible nozzle opening.

Hydraulic similarity laws still apply. However, secondary effects specific to model testing can influence the measured hydraulic characteristics.

10.4.3 Methods of testing in the extended operating range

10.4.3.1 General

The measuring instrumentation used in the extended operating range is often the same as that used in the normal operating range. As a result, the errors in measurement can be higher than what would be allowable for normal operating range testing.

Tests which could lead to damage on the model or test rig are often measured after all normal operating range testing has been completed. Some examples of individual tests are as follows:

- low or high n_{ED} ;
- low or high Q_{EB} ;
- runaway/speed no-load.

10.4.3.2 Range between normal operating range and runaway

To avoid damage to the model and test rig, the test specific hydraulic energy can be reduced while testing in this extended operating range.

As model measurements in transient conditions are often used to calculate peak instabilities, it is necessary to define the transient curves as accurately as possible. This can require modifications to the test rig in order to better stabilize the system (e.g. stabilizing flow during low discharge conditions). Several simple modifications to the test rig can be performed as follows:

- installation of an adjustable dissipation valve on the main circuit;
- installation of a small diameter bypass pipe at the high-pressure side of the runner.

In practice, to obtain the operational characteristics in the extended operating range, separate tests are often performed at different times in the test schedule and the results are combined at the end of testing.

10.4.3.3 Runaway

The particular case when there is zero torque corresponds to turbine runaway. When runaway speed is equal to the synchronous rotational speed of the machine, the machine is in speed no-load condition.

For this type of testing, a reduced specific hydraulic energy is recommended in order to protect the measurement equipment. In addition, deviations from full homology (e.g. increased clearances between rotating and stationary parts of the model machine) are acceptable for the same reason.

10.4.3.4 Range of efficiency cliff

The value of n_{ED} corresponding to the inception of the efficiency cliff can be determined, and the efficiency can be measured for different values of specific energy higher than this limit, for different nozzles opening.

The range of inception of the efficiency cliff can vary between model and prototype. The measured efficiency beyond the efficiency cliff cannot be transposed from model to prototype with standard methods such as described in Annex G.

10.5 Differential pressure measurement in view of prototype index test

10.5.1 General

If index testing at the prototype machine is anticipated, some additional measurements can be performed during model testing. This subclause only deals with index testing using differential pressure as an index value. Index tests in the model can never be a substitute for an absolute discharge measurement at the prototype.

Differential pressure measurement for index testing is made on a well-chosen pair of taps showing a significant pressure difference related to local kinetic energy.

According to IEC 60041:1991, the equation for index testing using differential pressure measurement can be written as:

$$Q = k \Delta p^n$$

where

Δp is the differential pressure measured with a differential manometer or a differential pressure transducer connected between the taps,

k is a constant (see 10.5.4), and

n is a constant (see 10.5.4) with a theoretical value of 0,5.

10.5.2 Purpose of test

The purposes of additional measurements in the model are:

- to select a proper position of pressure taps giving a significant differential pressure;
- to determine the maximum differential pressure to be expected at the prototype. This information enables a proper selection of instrumentation;
- to check the stability of the differential pressure at the selected pressure taps;
- to verify that the relationship between pressure difference and the discharge is not influenced by other operating parameters (e.g. nozzle opening, η_{ED} , etc.).

10.5.3 Execution of test

10.5.3.1 Pressure taps

Different locations of pressure taps can be chosen. A typical example is given in Figure 44 with differential pressure measurement between stagnation point (1 or 1') and at the wall (2 and 2') of the nozzle.

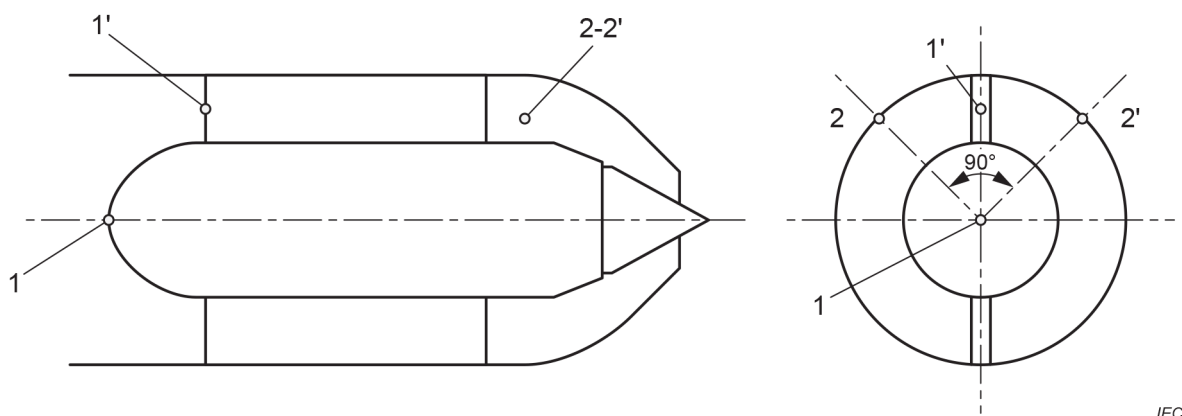


Figure 44 – Example of pressure tap location for index test

The design of pressure taps shall be in accordance with the requirements stated in 7.2.3.

10.5.3.2 Instrumentation

Differential manometers or differential pressure transducers shall be selected to cover the complete range of expected differential pressure and used within their optimum measuring range.

10.5.3.3 Test procedure

To demonstrate that the chosen pair of pressure taps has been suitably located, the following procedures are recommended:

- vary model discharge by varying needle opening while maintaining constant specific hydraulic energy;
- in a second step vary discharge by varying specific hydraulic energy at a constant needle opening.

It is possible to simultaneously measure these differential pressures and main hydraulic performance characteristics.

10.5.4 Analysis of test results

The exact values of k and n shall be derived from a linear regression, using the least square method, displaying the measured data in a $\lg(Q_M)$ versus $\lg(\Delta p_M)$ diagram (see Figure 45).

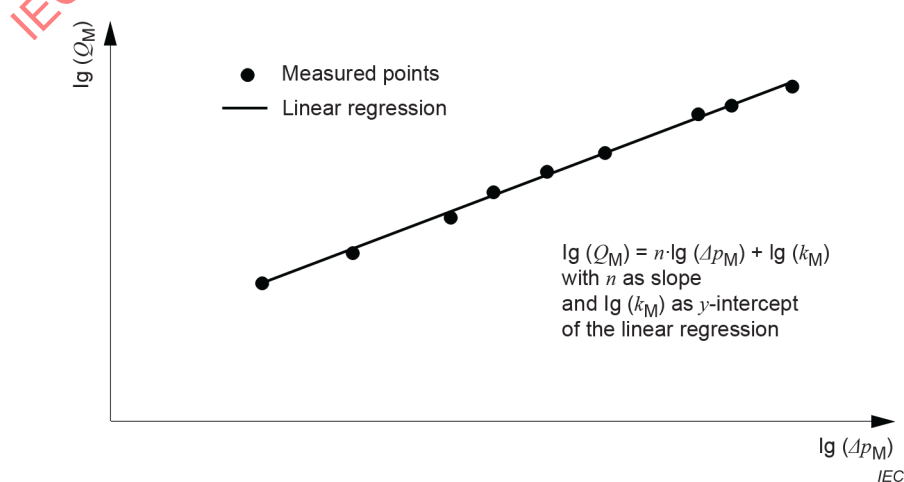


Figure 45 – Example of graphical representation of index test data

Suitability of a chosen pair of taps can be assumed if all the readings taken under various conditions of flow form a power function of discharge within the range of $0,48 \leq n \leq 0,52$. If the slope of the linear regression is out of this range, new pressure tap locations should be considered.

10.5.5 Transposition to prototype conditions

Model index testing cannot be used as an absolute determination of discharge at the prototype. It is only used to estimate prototype equipment measuring range. The following equations can be used to calculate the magnitude of differential pressure for the prototype:

$$Q_P = k_P (\Delta p)_P^{n_P}$$

$$Q_M = k_M (\Delta p)_M^{n_M}$$

with

$$k_P = k_M \left(\frac{D_P^{(3-2n_P)}}{D_M^{(3-2n_M)}} \right) \left(\frac{n_P^{(1-2n_P)}}{n_M^{(1-2n_M)}} \right)$$

If $n_P = n_M = n$, then

$$k_P = k_M \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^{(3-2n)} \left(\frac{n_P}{n_M} \right)^{(1-2n)}$$

10.5.6 Uncertainty

Even under favourable circumstances, applicable tolerances for prototype fabrication and for location of pressure taps together with deviations in inflow conditions result in an uncertainty in the determination of prototype discharge based on model test results of about $\pm 5\%$.

10.6 Nozzle flow discharge calibration in view of prototype index test

With homologous model test results available, the discharge in the prototype can be derived from the normalized nozzle opening characteristic measured in the model. By measuring the nozzle opening and deriving the net head from the static pressure measurement at the intake the discharge can be calculated.

With state of the art installed equipment nozzle stroke feedback sensors, typical measurement uncertainty in the determination of prototype discharge based on flow discharge calibration is approximately of $\pm 2\%$.

Annex A (informative)

Dimensionless terms

Table A.1 shows dimensionless terms.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

Table A.1 – Dimensionless terms

Definition in 3.4.13 ^{a)}				Relation to other existing definitions						
Clause	Term	Sym- bol	Definition	Relations	I			II		
					Sym- bol	Definition	Relation to term	Sym- bol	Definition	Relation to term
3.4.13.1	Speed factor	η_{ED}	$\frac{nD}{E^{0,5}}$	$= \frac{1}{E_{nD}^{0,5}}$	K_u	$\psi^{-0,5} = \frac{\omega D / 2}{\sqrt{2} E^{0,5}}$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} K_u$	n_{11}	$\frac{nD}{H^{0,5}}$ (n in min ⁻¹)	$\frac{1}{60 g^{0,5} n_{11}}$
3.4.13.2	Discharge factor	Q_{EB}	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0,5}}$	$= z_j Q_{EB}$	Q_{ED}	$\frac{Q_1}{D^2 E^{0,5}}$	$\left(\frac{D}{B}\right)^2 Q_{ED}$	Q_{11B}	$\frac{Q_1}{B^2 H^{0,5}}$	$\frac{1}{g^{0,5} Q_{11B}}$
3.4.13.3	Discharge factor per nozzle	$Q_{EB,zj}$	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0,5} z_j}$	$= \frac{Q_{EB}}{z_j}$				$Q_{11B,zj}$	$\frac{Q_1}{B^2 H^{0,5} z_j}$	$\frac{1}{g^{0,5} Q_{11B,zj}}$
3.4.13.4	Torque factor	T_{ED}	$\frac{T_m}{\rho_1 D^3 E}$	$= \frac{P_{ED}}{2\pi \eta_{ED}}$	T_{EB}	$\frac{T_m}{\rho_1 D^3 E}$	$\left(\frac{B}{D}\right)^2 T_{EB}$	T_{11}	$\frac{T_m}{D^3 H}$ (T_m in Nm)	$\frac{1}{\rho_1 g T_{11}}$
3.4.13.5	Power factor	P_{ED}	$\frac{P_m}{\rho_1 D^2 E^{1,5}}$ ^{b)}	$= 2\pi \eta_{ED} T_{ED}$ $= Q_{EB} \eta_h (B / D)^2$	P_{EB}	$\frac{P_m}{\rho_1 B^2 E^{1,5}}$	$\left(\frac{B}{D}\right)^2 P_{EB}$	P_{11}	$\frac{P_m}{D^2 H^{1,5}}$ (P_m in kW)	$\frac{1000}{\rho_1 g^{1,5} P_{11}}$
3.4.13.6	Specific flow rate	f_B	$\frac{Q_1}{\pi (B / 2)^2 (2E)^{0,5} z_j}$	$= \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \frac{Q_{EB}}{z_j}$						
3.4.13.7	Energy coefficient	E_{nD}	$\frac{E}{n^2 D^2}$	$= \frac{1}{\eta_{ED}^2}$	ψ	$\frac{2E}{(\omega D / 2)^2}$	$\frac{\pi^2}{2} \psi$			

a) Units: H (m); D (m); B (m); E (J kg⁻¹); n (s⁻¹); ρ (kg m⁻³); T (N m); P (W); Q (m³·s⁻¹).

b) Reference is made to the mechanical power of the runner, usually measured on the model.

Annex B (normative)

Physical properties, data

Table B.1 – Acceleration due to gravity g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

Latitude φ °	Altitude above mean sea level z				
	m				
	0	1 000	2 000	3 000	4 000
0	9,780	9,777	9,774	9,771	9,768
5	9,781	9,778	9,775	9,772	9,769
10	9,782	9,779	9,776	9,773	9,770
15	9,784	9,781	9,778	9,775	9,772
20	9,786	9,783	9,780	9,777	9,774
25	9,790	9,787	9,784	9,781	9,778
30	9,793	9,790	9,787	9,784	9,781
35	9,797	9,794	9,791	9,788	9,785
40	9,802	9,799	9,796	9,793	9,790
45	9,806	9,803	9,800	9,797	9,794
50	9,811	9,808	9,805	9,802	9,799
55	9,815	9,812	9,809	9,806	9,803
60	9,819	9,816	9,813	9,810	9,807
65	9,822	9,820	9,817	9,814	9,811
70	9,826	9,823	9,820	9,817	9,814
NOTE 1 Values for g are given as a function of latitude and altitude.					
NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.1 and 4.2.					

Table B.2 – Density of distilled water ρ_{wd} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Temperature θ °C	Absolute pressure p_{abs} 10 ⁵ Pa							
	1	10	20	30	40	50	60	70
0	999,8	1 000,3	1 000,8	1 001,3	1 001,8	1 002,3	1 002,8	1 003,3
1	999,9	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,9	1 003,4
2	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,9	1 003,4
3	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,9	1 003,4
4	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,9	1 003,4
5	999,9	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,8	1 003,3
6	999,9	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,8	1 002,3	1 002,8	1 003,3
7	999,9	1 000,3	1 000,8	1 001,3	1 001,8	1 002,3	1 002,7	1 003,2
8	999,9	1 000,3	1 000,8	1 001,2	1 001,7	1 002,2	1 002,7	1 003,2
9	999,8	1 000,2	1 000,7	1 001,2	1 001,6	1 002,1	1 002,6	1 003,1
10	999,7	1 000,1	1 000,6	1 001,1	1 001,6	1 002,0	1 002,5	1 003,0
11	999,6	1 000,0	1 000,5	1 001,0	1 001,4	1 001,9	1 002,4	1 002,9
12	999,5	999,9	1 000,4	1 000,9	1 001,3	1 001,8	1 002,3	1 002,7
13	999,4	999,8	1 000,3	1 000,7	1 001,2	1 001,7	1 002,1	1 002,6
14	999,2	999,7	1 000,1	1 000,6	1 001,1	1 001,5	1 002,0	1 002,4
15	999,1	999,5	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,4	1 001,8	1 002,3
16	998,9	999,4	999,8	1 000,3	1 000,7	1 001,2	1 001,7	1 002,1
17	998,8	999,2	999,6	1 000,1	1 000,6	1 001,0	1 001,5	1 001,9
18	998,6	999,0	999,5	999,9	1 000,4	1 000,8	1 001,3	1 001,7
19	998,4	998,8	999,3	999,7	1 000,2	1 000,6	1 001,1	1 001,5
20	998,2	998,6	999,1	999,5	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,3
21	998,0	998,4	998,9	999,3	999,8	1 000,2	1 000,7	1 001,1
22	997,8	998,2	998,6	999,1	999,5	1 000,0	1 000,4	1 000,9
23	997,5	997,9	998,4	998,8	999,3	999,7	1 000,2	1 000,6
24	997,3	997,7	998,1	998,6	999,0	999,5	999,9	1 000,4
25	997,0	997,4	997,9	998,3	998,8	999,2	999,7	1 000,1
26	996,8	997,2	997,6	998,1	998,5	999,0	999,4	999,9
27	996,5	996,9	997,4	997,8	998,3	998,7	999,1	999,6
28	996,2	996,6	997,1	997,5	998,0	998,4	998,9	999,3
29	995,9	996,3	996,8	997,2	997,7	998,1	998,6	999,0
30	995,7	996,1	996,5	996,9	997,4	997,8	998,3	998,7
31	995,3	995,7	996,2	996,6	997,1	997,5	997,9	998,4
32	995,0	995,4	995,9	996,3	996,8	997,2	997,6	998,1
33	994,7	995,1	995,5	996,0	996,4	996,9	997,3	997,7
34	994,4	994,8	995,2	995,7	996,1	996,5	997,0	997,4
35	994,0	994,4	994,9	995,3	995,8	996,2	996,6	997,1
36	993,7	994,1	994,5	995,0	995,4	995,8	996,3	996,7
37	993,3	993,7	994,2	994,6	995,0	995,5	995,9	996,3
38	993,0	993,4	993,8	994,2	994,7	995,1	995,5	996,0
39	992,6	993,0	993,4	993,9	994,3	994,7	995,2	995,6
40	992,2	992,6	993,1	993,5	993,9	994,4	994,3	995,2

NOTE 1 Values for ρ_{wd} are given as a function of temperature θ (°C) and absolute pressure p_{abs} (10⁵ Pa).

NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.4 and 4.3.1.3.

Temperature θ °C	Absolute pressure pabs							
	10 ⁵ Pa							
	80	90	100	110	120	130	140	150
0	1 003,8	1 004,3	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,3	1 006,8	1 007,3
1	1 003,9	1 004,3	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,3	1 006,8	1 007,3
2	1 003,9	1 004,4	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,3	1 006,8	1 007,3
3	1 003,9	1 004,4	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,3	1 006,8	1 007,3
4	1 003,8	1 003,4	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,3	1 006,7	1 007,2
5	1 003,8	1 004,3	1 004,8	1 005,3	1 005,7	1 006,2	1 006,7	1 007,2
6	1 003,8	1 004,2	1 004,7	1 005,2	1 005,7	1 006,2	1 006,2	1 007,1
7	1 003,7	1 004,2	1 004,7	1 005,1	1 005,6	1 006,1	1 006,5	1 007,0
8	1 003,6	1 004,1	1 004,6	1 005,0	1 005,5	1 006,0	1 006,5	1 006,9
9	1 003,5	1 004,0	1 004,5	1 005,0	1 005,4	1 005,9	1 006,4	1 006,8
10	1 003,4	1 003,9	1 004,4	1 004,8	1 005,3	1 005,8	1 006,2	1 006,7
11	1 003,3	1 003,8	1 004,3	1 004,7	1 005,2	1 005,6	1 006,1	1 006,6
12	1 003,2	1 003,7	1 004,1	1 004,6	1 005,0	1 005,5	1 006,0	1 006,4
13	1 003,1	1 003,5	1 004,0	1 004,4	1 004,9	1 005,4	1 005,8	1 006,3
14	1 002,9	1 003,4	1 003,8	1 004,3	1 004,7	1 005,2	1 005,7	1 006,1
15	1 002,7	1 003,2	1 003,7	1 004,1	1 004,6	1 005,0	1 005,5	1 005,9
16	1 002,6	1 003,0	1 003,5	1 003,9	1 004,4	1 004,8	1 005,3	1 005,8
17	1 002,4	1 002,8	1 003,3	1 003,8	1 004,2	1 004,7	1 005,1	1 005,6
18	1 002,2	1 002,7	1 003,1	1 003,6	1 004,0	1 004,5	1 004,9	1 005,4
19	1 002,0	1 002,4	1 002,9	1 003,3	1 003,8	1 004,2	1 004,7	1 005,1
20	1 001,8	1 002,2	1 002,7	1 003,1	1 003,6	1 004,0	1 004,5	1 004,9
21	1 001,6	1 002,0	1 002,5	1 002,9	1 003,3	1 003,8	1 004,2	1 004,7
22	1 001,3	1 001,8	1 002,2	1 002,7	1 003,1	1 003,5	1 004,0	1 004,4
23	1 001,1	1 001,5	1 002,0	1 002,4	1 002,9	1 003,3	1 003,7	1 004,2
24	1 000,8	1 001,3	1 001,7	1 002,2	1 002,6	1 003,0	1 003,5	1 003,9
25	1 000,6	1 001,0	1 001,5	1 001,9	1 002,3	1 002,8	1 003,2	1 003,7
26	1 000,3	1 000,7	1 001,2	1 001,6	1 002,1	1 002,5	1 002,9	1 003,4
27	1 000,0	1 000,5	1 000,9	1 001,3	1 001,8	1 002,2	1 002,7	1 003,1
28	999,7	1 000,2	1 000,6	1 001,1	1 001,5	1 001,9	1 002,4	1 002,8
29	999,4	999,9	1 000,3	1 000,8	1 001,2	1 001,6	1 002,1	1 002,5
30	999,1	999,6	1 000,0	1 000,4	1 000,9	1 001,3	1 001,7	1 002,2
31	998,8	999,3	999,7	1 000,1	1 000,6	1 001,0	1 001,4	1 001,9
32	998,5	998,9	999,4	999,8	1 000,2	1 000,7	1 001,1	1 001,5
33	998,2	998,6	999,0	999,5	999,9	1 000,3	1 000,8	1 001,2
34	997,8	998,3	998,7	999,1	999,6	1 000,0	1 000,4	1 000,9
35	997,5	997,9	998,4	998,8	999,2	999,7	1 000,1	1 000,5
36	997,1	997,6	998,0	998,4	998,9	999,3	999,7	1 000,2
37	996,8	997,2	997,6	998,1	998,5	998,9	999,4	999,8
38	996,4	996,8	997,3	997,7	998,1	998,6	999,0	999,4
39	996,0	996,5	996,9	997,3	997,8	998,2	998,6	999,0
40	995,7	996,1	996,5	996,9	997,4	997,8	998,2	998,7

Table B.3 – Kinematic viscosity of distilled water ν ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

Water temperature θ °C	Kinematic viscosity ν $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	Water temperature θ °C	Kinematic viscosity ν $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
0	$1,791 \times 10^{-6}$	21	$0,980 \times 10^{-6}$
1	$1,731 \times 10^{-6}$	22	$0,957 \times 10^{-6}$
2	$1,674 \times 10^{-6}$	23	$0,934 \times 10^{-6}$
3	$1,620 \times 10^{-6}$	24	$0,913 \times 10^{-6}$
4	$1,568 \times 10^{-6}$	25	$0,892 \times 10^{-6}$
5	$1,520 \times 10^{-6}$	26	$0,873 \times 10^{-6}$
6	$1,473 \times 10^{-6}$	27	$0,854 \times 10^{-6}$
7	$1,429 \times 10^{-6}$	28	$0,835 \times 10^{-6}$
8	$1,387 \times 10^{-6}$	29	$0,817 \times 10^{-6}$
9	$1,346 \times 10^{-6}$	30	$0,800 \times 10^{-6}$
10	$1,308 \times 10^{-6}$	31	$0,784 \times 10^{-6}$
11	$1,271 \times 10^{-6}$	32	$0,768 \times 10^{-6}$
12	$1,236 \times 10^{-6}$	33	$0,753 \times 10^{-6}$
13	$1,202 \times 10^{-6}$	34	$0,738 \times 10^{-6}$
14	$1,170 \times 10^{-6}$	35	$0,723 \times 10^{-6}$
15	$1,140 \times 10^{-6}$	36	$0,709 \times 10^{-6}$
16	$1,110 \times 10^{-6}$	37	$0,696 \times 10^{-6}$
17	$1,082 \times 10^{-6}$	38	$0,683 \times 10^{-6}$
18	$1,055 \times 10^{-6}$	39	$0,670 \times 10^{-6}$
19	$1,029 \times 10^{-6}$	40	$0,658 \times 10^{-6}$
20	$1,004 \times 10^{-6}$		

NOTE 1 Values for ν are given as a function of water temperature θ (°C) at absolute pressure $p_{\text{abs}} = 10^5$ Pa.

NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.7 and 4.3.2.

Table B.4 – Vapour pressure of distilled water p_{va} (Pa)

Temperature θ °C	Vapour pressure p_{va} Pa	Temperature θ °C	Vapour pressure p_{va} Pa
0	611		
1	657	21	2 488
2	706	22	2 645
3	758	23	2 810
4	814	24	2 985
5	873	25	3 169
6	935	26	3 363
7	1 002	27	3 567
8	1 073	28	3 782
9	1 148	29	4 008
10	1 228	30	4 246
11	1 313	31	4 495
12	1 403	32	4 758
13	1 498	33	5 034
14	1 599	34	5 323
15	1 706	35	5 627
16	1 819	36	5 945
17	1 938	37	6 280
18	2 064	38	6 630
19	2 198	39	6 997
20	2 339	40	7 381
NOTE 1 Values for p_{va} are given as a function of water temperature θ (°C).			
NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.5 and 4.3.3.			

Table B.5 – Density of dry air ρ_a (kg·m⁻³)

Air temperature θ_a (°C)	Density of dry air ρ_a (kg·m ⁻³)
0	1,293
2	1,284
4	1,274
6	1,265
8	1,256
10	1,247
12	1,238
14	1,230
16	1,221
18	1,213
20	1,205
22	1,196
24	1,188
26	1,180
28	1,173
30	1,165
NOTE 1 Values are given as a function of air temperature θ_a (°C) at absolute ambient pressure $p_{amb,0} = 101\,325$ Pa.	
NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.4 and 4.4.1.	

Table B.6 – Ambient pressure p_{amb} (Pa)

Elevation z m	Ambient pressure p_{amb} Pa	Elevation z m	Ambient pressure p_{amb} Pa
0	101 325		
100	100 129	2 100	78 520
200	98 945	2 200	77 548
300	97 773	2 300	76 586
400	96 611	2 400	75 634
500	95 461	2 500	74 692
600	94 322	2 600	73 759
700	93 194	2 700	72 835
800	92 076	2 800	71 921
900	90 970	2 900	71 017
1 000	89 876	3 000	70 121
1 100	88 792	3 100	69 235
1 200	87 718	3 200	68 358
1 300	86 655	3 300	67 490
1 400	85 602	3 400	66 631
1 500	84 560	3 500	65 780
1 600	83 528	3 600	64 939
1 700	82 506	3 700	64 106
1 800	81 494	3 800	63 283
1 900	80 493	3 900	62 467
2 000	79 501	4 000	61 660

NOTE 1 Values are given as a function of elevation z (m).

NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.6.2 and 4.4.2.

Table B.7 – Density of mercury ρ_{Hg} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Temperature θ °C	Density ρ_{Hg} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Temperature θ °C	Density ρ_{Hg} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
0	13 595	21	13 543
1	13 593	22	13 541
2	13 590	23	13 538
3	13 588	24	13 536
4	13 585	25	13 534
5	13 583	26	13 531
6	13 580	27	13 529
7	13 578	28	13 526
8	13 575	29	13 524
9	13 573	30	13 521
10	13 570	31	13 519
11	13 568	32	13 516
12	13 565	33	13 514
13	13 563	34	13 511
14	13 561	35	13 509
15	13 558	36	13 507
16	13 556	37	13 504
17	13 553	38	13 502
18	13 551	39	13 499
19	13 548	40	13 497
20	13 546		

NOTE 1 Values are given as a function of temperature θ (°C) at absolute ambient pressure $p_{\text{amb},0} = 101\,325$ Pa (standard ambient pressure at sea level).

NOTE 2 Definition and formula: see 3.4.4.4 and 4.5.

Annex C (informative)

Summarized test and calculation procedure

C.1 General

This annex contains a list of agreements, checks and operations to be carried out before, during and after the tests.

In addition, the main aspects of a test point calculation, together with all the information necessary to make a comparison with the guarantees, including the evaluation of the measurement uncertainties are summarized below.

For each point, reference is made to the applicable subclauses of this document.

C.2 Agreements to be reached prior to testing

Agreement between the parties shall be reached, in due time before the test:

For model:

- the model size (8.5.2) and the length scale ratio λ_L (3.4.3.5);
- the model structural characteristics (5.1.3.2);
- similitude requirements (8.4);
- the test conditions (8.5.1);
- the value of Froude number (8.4.5);
- the extent of the model (5.1.3.3);
- the reference sections (9.1.1);
- the pressure measuring sections (7.2.2 and 8.2.2.1) and the areas for the calculation of specific hydraulic energy (8.2.3).

For guarantees:

- the guaranteed values of power, discharge, efficiency and steady-state runaway speed (9.2);
- the transposition method and formulae (8.6).

For prototype conditions:

- g_P prototype value of gravitational acceleration (4.2);
- θ_P prototype water temperature and corresponding kinetic viscosity ν_P (4.3.2);
- ρ_P prototype water density (4.3.1);
- n_P steady-state prototype speed;
- Fr_P steady-state Froude number of prototype (3.4.12.2);
- E_{Pmax} maximum specific hydraulic energy applied to runaway condition (9.2.1.4);
- mechanical power losses of the prototype (9.2.1.1);
- electrical machine windage losses (Annex D).

For the execution of tests:

- all other specifications for the model tests (5.3.1.2);
- the time schedule of the tests (5.3.1.3);
- the personnel and responsibilities (5.3.1.4);
- the type and extent of the tests to be performed (5.3.3);
- the calibration procedure for the instruments to be utilized (5.3.1.6).

C.3 Model, test facility and instrumentation

C.3.1 Model manufacture and dimensional checks

The model shall be manufactured according to 5.1.3.2 and subjected to the dimensional checks outlined in 5.2 and 5.3.1.7. Particular attention shall be paid to:

- the value of the reference diameter (3.4.3.3);
- checking clearances between the runner and static components (5.3.2.2);
- the roughness or surface quality of wetted surfaces (5.2.10).

C.3.2 Test facility instrumentation and data acquisition system

The test rig and the complete circuit shall be carefully checked (5.3.2.3) before and during the tests, paying particular attention to the condition of the pressure tap lines for any leakage.

The instrumentation and the data acquisition system shall also be carefully checked and calibrated before and after the tests (5.3.2.4).

The following is usually verified by means of specific operation tests:

- the regularity of the pressure at the taps of the model high-pressure measuring section (7.2.3.1);
- the proper response of the instrumentation at the same operating point tested during different test series (5.3.3.1).

C.4 Tests and calculation of the model values

C.4.1 Test types

Usually, a complete preparatory test and preliminary test are carried out by, or in the presence of the manufacturer to verify all the guarantees required in the contract and to define the whole operating behaviour of the machine. The acceptance tests, witnessed by all the parties involved, are subsequently carried out (5.3.3.1).

C.4.2 Measurement of the main quantities during the test

For each test point, the average values of the readings of the instruments measuring the quantities listed below shall be obtained. Measurements are made in accordance with 6.1 and 8.6.2.1:

- discharge (7.1);
- pressure at the high-pressure and low-pressure measuring sections (or alternatively differential pressure between sections 1 and 2 and suction pressure at section 2) (7.2, 7.3, 8.2);
- torque (7.4);
- rotational speed (7.5);

- test circuit water temperature (5.1.2.3);
- ambient temperature (5.1.2.3);
- ambient pressure (4.4.2).

The calibrations of all the measurement instruments shall be made available and checked (5.3.1.6).

The value of the constants necessary for the calculation, for example: g (4.2), ρ (4.3.1), z_c , p_{va} (4.3.3), v (4.3.2), length of levers (7.4.2.1), T_{Lm} (7.4.6.3) shall be known or calculated for the conditions of the tests.

C.4.3 Uncertainty of the measured quantities

C.4.3.1 Uncertainty due to systematic errors

The values necessary to determine the uncertainty band due to systematic errors shall be fixed and agreed upon for each quantity (see for example 6.3.2.3.2 and Annex F).

C.4.3.2 Uncertainty due to random errors

The value of the uncertainty due to random errors shall be calculated from a test either near the maximum efficiency or, where necessary, at partial load (8.5.3, 6.3.2.3.1 and Annex H).

C.4.3.3 Total uncertainty

The total uncertainty is the combination of the above systematic and random components of the uncertainty and defines the uncertainty band of the curves used for the comparison to guarantees (6.3.2.3.4 and 9.4.2).

C.4.4 Calculation of the quantities related to the main hydraulic performance

Using the constants and the measurements listed, and using the calibration data and the relations given in 8.3.3 for the hydraulic efficiency calculation, the values of ρ_M , Q_M , E_M , P_{mM} and η_{hM} are calculated.

C.4.5 Calculation of the dimensionless factors or coefficients and of the Thoma number

Using the relations of 3.4.13, the values of Q_{EB} , E_{nD} or n_{ED} , and P_{EB} can be calculated.

C.5 Calculation of prototype quantities

Based on 8.6.2.3 and 8.6.2.4 for steady-state operation at a specified η_P , the values of Q_P , E_P , P_{mP} and η_{hP} are obtained taking into account the transposition of efficiency $(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow P}$.

The turbine efficiency η_P and the mechanical power P_P of the prototype machine shall be calculated taking into account the mechanical power losses P_{LM} of the prototype (3.4.9.4, 9.2.1.1 and 9.4.4) and the electrical machine windage losses (see Annex D).

For runaway operation, see 8.6.3.2 and 8.6.3.3 for calculating η_{RP} and Q_{RP} .

C.6 Plotting of model or prototype results

The points or curves of model or prototype results are plotted on the basis of a proper number of test points (8.6.2.2 and 9.4.2) after having removed any spurious point (see 6.3.1.3.2). If an interpolation curve is necessary, an example of its determination is given in Annex E.

The above points or curves are plotted with the uncertainty band where necessary (9.4.2) for comparison with guarantees.

C.7 Comparison with the guarantees

Fulfilment of the guarantees will be established as outlined in 9.4.

For the application of penalties and premiums, if any, see 9.4.6.

C.8 Final protocol

The final protocol, completed by the daily log and the test results documents, duly signed, shall be drawn at the end of the acceptance tests (5.3.3.8) and, once signed by all the involved parties, it closes the acceptance model tests. All expected guarantees that were checked for compliance shall be mentioned and the protocol shall clearly state if the expected guarantees were met or not.

C.9 Final test report

The final test report (5.3.5) shall contain all the documents pertaining to the official tests and shall be completed after the tests within a time mutually agreed (normally two months).

Annex D (normative)

Computation of the prototype runaway characteristics taking into account friction and windage losses of the unit

The prototype maximum runaway speed and discharge computed from the model tests in accordance with 8.6.3.2 shall be corrected for the friction losses of the unit bearings and shaft seal and the windage losses of the electrical machine, which determine a decrease of the maximum runaway speed from $n_{Rmax,P}$ to $n'_{Rmax,P}$.

The procedure is the following:

Using the measured points X_1, X_2, X_3 , etc. at constant needle stroke in the range near to runaway (close to zero runner torque), plot the curve $P_{mP}(n_P)$ (see Figure D.1). If the chosen opening corresponds to the maximum runaway speed, the intersection point Y of the curve $P_{mP}(n_P)$ with the curve $P_{Lm}+P_W(n_P)$, with P_{Lm} , representing the sum of the bearing and shaft seal friction losses of the unit and P_W , the electrical machine windage losses⁸, is at the maximum steady-state runaway speed $n'_{Rmax,P}$ to be expected for the unit.

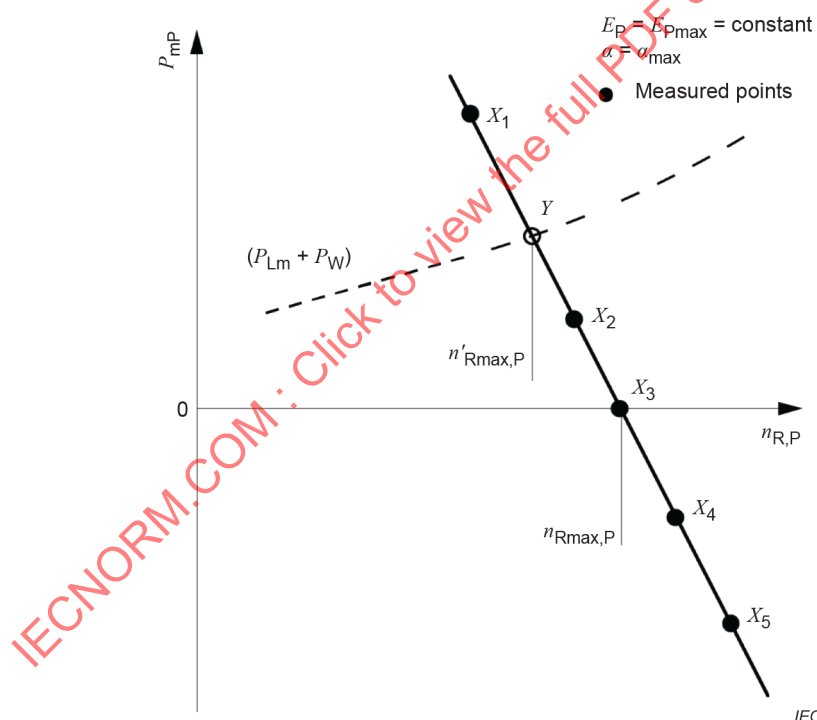


**Figure D.1 – Determination of the maximum runaway speed
of the prototype taking into account the friction and windage losses of the unit**

⁸ For the determination of these losses, see IEC 60041:1991, 12.1.2.3.

Annex E

(informative)

Example of determination of the best smooth curve: method of separate segments

E.1 General

In model testing, unlike prototype testing, a large number of operating points are generally measured and sometimes, a measurement point is repeated very close to a previous one. Furthermore, the test range generally extends above and below the guaranteed range, but the measurement points are concentrated within the range of guarantees.

In such a case, the classical least squares method, based on a single function, cannot be used to determine the best fitted curve passing through the points; if the polynomial degree increases, then the curve passes closer to the points but can deviate, sometimes notably, from the regular expected shape.

As the mathematical form of the law expressing the physical phenomenon is in most cases unknown, a more convenient way to determine by computation the best fitted curve is to arbitrarily split the test range into segments. Then the least squares method can be applied to each segment using low degree polynomials which lead to reasonably smooth curves.

Several computerized methods of drawing the interpolation curves are available. There are methods based on:

- normal spline functions;
- B-splines;
- representation of surfaces.

As an example, a modified least squares method is described below.

E.2 Principle of the method

A series of intervals along the abscissa are determined as described below.

- Three adjacent intervals (1, 2, 3 in Figure E.1) form the range in which the least squares method is applied, but only the central segment 2 of the curve is directly defined by this way.
- The procedure is then repeated by shifting by two steps, left and right, in order to obtain a series of separate segments (segment a in Figure E.2).
- The remaining intervals are then filled with segments of curve (segment b in Figure E.2) passing through the extreme points of segments a with the same slope at these points.
- The two extreme segments at the ends of the test range are drawn directly by the least squares method (segment c in Figure E.2), using the same numerical coefficients of the polynomials as in the corresponding adjacent segment.

A degree of 3 is assumed, as a rule, for the polynomials in segments of both types, segments a and b. Depending on the arrangement of the points and on the width of the intervals, at the end of the test range (where the least squares methods should be applied), it can happen that there are only a sufficient number of points to define a group of two intervals, instead of three, then, the polynomial shall be reduced to degree 2.

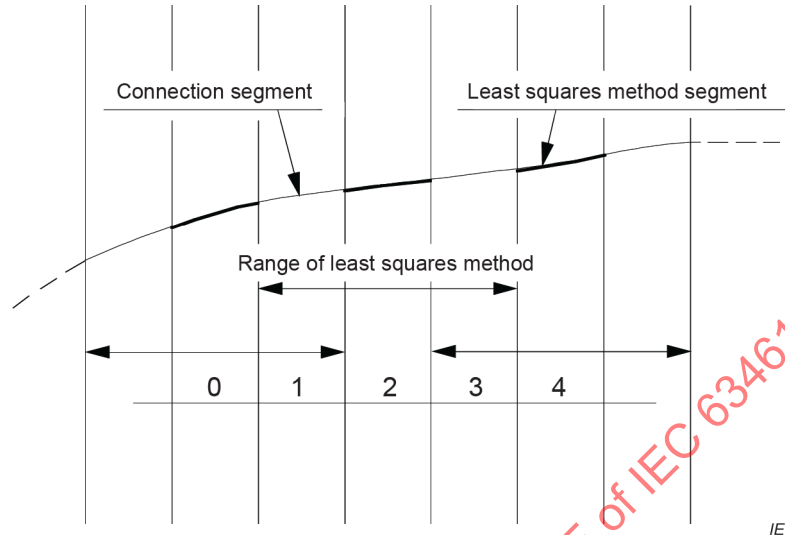


Figure E.1 – Principle of the method of separate segments

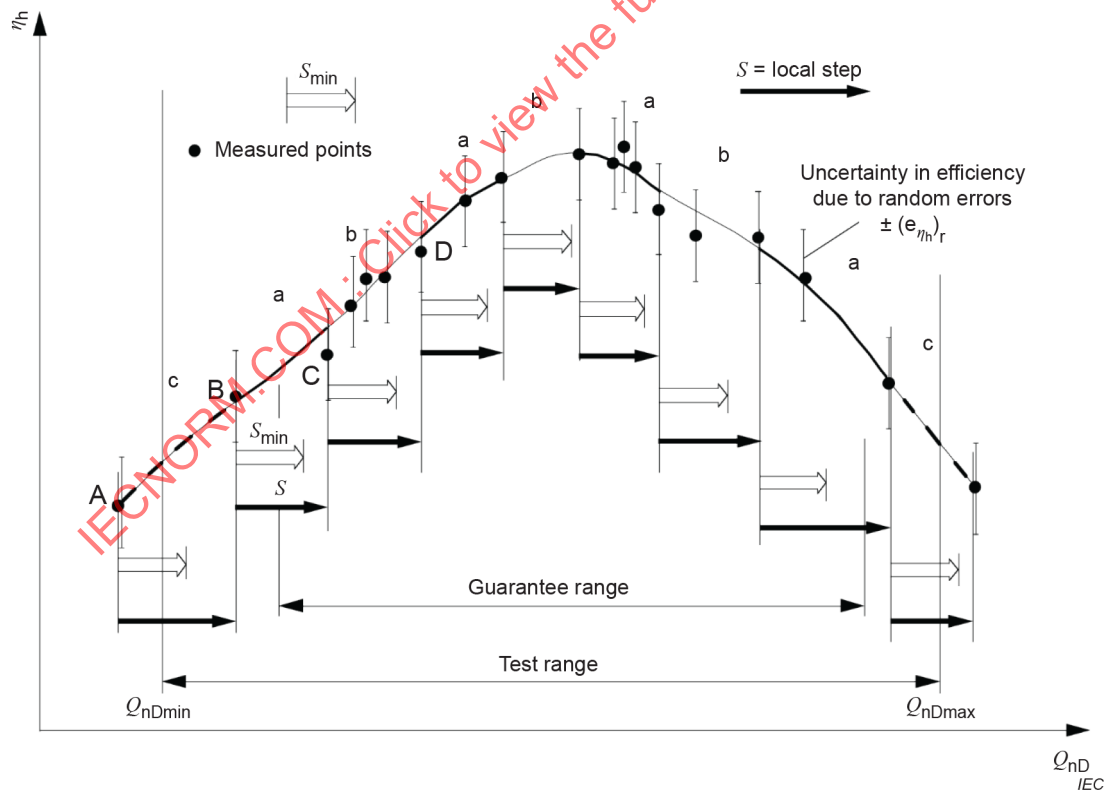


Figure E.2 – Example of determination of intervals

E.3 Choice of the minimum width of the intervals

A value of the minimum width of the intervals, $S_{\min}$, shall be assumed. The most convenient $S_{\min}$ value is small enough to give a good definition of the interpolation curve. Attention shall be drawn to the fact that the choice of $S_{\min}$, and thus of the number of intervals, influences the shape of the curve:

- choosing a too large value of the interval $S_{\min}$ can result in an oversmoothed curve, which does not represent the actual physical phenomenon;
- choosing a too small value of the interval $S_{\min}$ can result in a curve reflecting the random scatter of the measurement points rather than the physical reality.

Therefore, the choice of an appropriate value of the interval $S_{\min}$ shall be left to the judgement of the chief of tests, taking into account that the interpolation curve shall, as far as possible, intersect the segments denoting the uncertainty due to random errors in each measurement point (see Figure E.2).

For example, when drawing the efficiency curve $\eta_h(Q_{nD})$, $S_{\min}$ may normally be chosen equal to approximately:

$$S_{\min} = \frac{(Q_{nD\max} - Q_{nD\min})}{10}$$

where $Q_{nD\min}$ and $Q_{nD\max}$ are the limiting values of the test range.

E.4 Determination of the intervals

To simplify the statement below, it is assumed to start the process from the left end of the test range.

From the first left measured point, two cases can occur:

- a) the next point lies at a distance along the abscissa greater than or equal to $S_{\min}$:
then the local interval S is defined by these two points (points A and B in Figure E.2);
- b) the next point lies at a distance along the abscissa less than $S_{\min}$:
proceeding towards the right side, the first measured point lying at a distance from the starting point greater than $S_{\min}$ shall then be sought. This point, together with the starting point, defines the width S of the local interval (points C and D in Figure E.2).

This procedure proceeds to the end of the test range. For the least squares method with a third degree polynomial being applicable, each group of three adjacent intervals shall contain at least four (4) measurement points.

Annex F (informative)

Examples of analysis of sources of error and uncertainty evaluation

F.1 General

This annex may be used as a guide for analysing sources of errors which may occur during model tests (see Table 4 in 6.3.2.2). It contains the following three examples:

- example of analysis of sources of error and of uncertainty evaluation in the measurement of a physical quantity (see F.2);
- example of calculation of the uncertainty due to systematic errors in the determination of the specific hydraulic energy, mechanical runner/impeller power and hydraulic efficiency (see F.3);

In general, the relative value of uncertainty f_X of a quantity X is used when calculating uncertainties in this document, where e_X is the absolute value and $f_X = e_X / X$.

Owing to the various ways of determining the required quantities, it is not possible to specify in this document a general statement for the relevant systematic errors. In the case of specific hydraulic energy, for example, the value of the uncertainty due to systematic errors depends on the instruments and the installation with the choice of instrumentation depending on the value of the specific hydraulic energy. At lower values of specific hydraulic energy, greater values of uncertainty $(f_E)_S$ are generally to be expected. For the same reason, the relative uncertainty due to systematic errors in the determination of the net positive suction specific energy is generally higher than this uncertainty in the determination of the specific hydraulic energy.

F.2 Example of analysis of sources of error and of uncertainty evaluation in the measurement of a physical quantity⁹

F.2.1 General

The following example illustrates how the various sources of error arising in the measurement of a quantity using an electronic device can be identified and how the corresponding uncertainties can be evaluated and combined. Table 4 is used as a guide for this analysis. All values given below are uncertainties at 95 % confidence level.

⁹ All the specific terms used in this annex are defined in ISO/IEC 99:2007.

F.2.2 Errors arising during calibration

F.2.2.1 Error components

a) Bias of the primary method: $\pm f_a$

This is the systematic component of the intrinsic error of the primary method used for the calibration. If, for example, the quantity to be measured is the discharge and if the calibration is made using the weighing method, and if the secondary instrument is an electronic device, the main sources of systematic error of the primary method are due to the mechanical operation of the weighing machine, to its proper calibration, to the operation of the diverter, to the chronometer, to the buoyancy correction and to the determination of the density. If all the requirements of ISO 4185 are complied with, the bias of the weighing method can be estimated by combining the component uncertainties due to systematic errors of the different error sources.

b) Repeatability of the primary method: $\pm f_b$

This is the random component of the intrinsic error of the primary method used for the calibration. In the example of item a) the main sources of random error of the primary method when using the weighing method are the scatter of the readings of the weighing machine (which can be evaluated from the scatter of the readings during the calibration of the weighing machine) and the repeatability of the motion of the diverter.

c) Bias of the secondary instrument: $\pm f_c$

This is the systematic component of the intrinsic error of the secondary instrument: In the example of item a) it is due mainly to a systematic error in the measurement of the output signal from the electronic device.

d) Repeatability of the secondary instrument: $\pm f_d$

This is the random component of the intrinsic error of the secondary instrument. In the example of item a), it is due mainly to the random error in the output signal measurement. It can be evaluated from the scatter of the points around the calibration curve.

e) Errors due to physical phenomena and influence quantities: $\pm f_e$

In this category, there can be various sources of error. With reference to the example of point a) are:

- the influence of the flow pattern on the response of the electronic device;
- the unsteadiness of the flow;
- the possible effect of physical properties of the water (conductivity, temperature, etc.) on the response of the electronic device;
- the effect of external influence quantities (fluctuations of power supply, ambient temperature, electromagnetic field, etc.).

The combination of all these errors can lead to an uncertainty in the indicated discharge which can be partly systematic and partly random in nature.

f) Errors in physical properties: $\pm f_f$

These are the errors arising in the determination of physical quantities either by direct measurement or from international standardized data. In the example of item a), the main source of error of this type is the determination of the water density when the volume flowrate is deduced from the mass flowrate measured by weighing.

F.2.2.2 Resulting uncertainty in the calibration

All the errors listed above being small, numerous and independent of each other, the systematic and random corresponding components of the uncertainties can be combined by the root-sum-square method (as explained in 6.3.1.4) to obtain the resulting relative uncertainty in the calibration curve:

$$f_{\text{cal}} = \pm \left[(f_a)^2 + (f_b)^2 + (f_c)^2 + (f_d)^2 + (f_e)^2 + (f_f)^2 \right]^{1/2}$$

F.2.3 Errors arising during the tests

F.2.3.1 Error components

- a) Total uncertainty in the calibration: $\pm f_{\text{cal}}$

Although the uncertainty in the calibration determined in F.2.2.2 consists of systematic and random error components, the error becomes entirely systematic when the calibration previously determined is used for subsequent tests.

- b) Additional systematic error: $\pm f_h$

This is the systematic component of the intrinsic error of the secondary instrument, not covered by the calibration.

- c) Errors in physical properties: $\pm f_j$

In certain cases, for example in the case of item F.2.2.1 a), this category of errors may be omitted.

- d) Errors due to physical phenomena and influence quantities: $\pm f_k$

The sources of error in this category are the same as those listed in F.2.2.1 e), but their values can be different and vary with the operating point. They may be neglected if the conditions occurring during the calibration are kept the same during the tests. If not, it is assumed that they result in a systematic component $\pm f_{ks}$ and a random component $\pm f_{kr}$.

- e) Random error: $\pm f_l$

This includes the repeatability of the secondary instrument. This error can be measured during the tests. In the example of F.2.2.1 a), it occurs once again in a similar manner as it did during calibration.

F.2.3.2 Total uncertainty in the measurement

Combining the component uncertainties by the root-sum-square method, the relative total uncertainty is obtained:

- a) uncertainty due to systematic errors:

$$f_s = \pm \left[(f_{\text{cal}})^2 + (f_h)^2 + (f_j)^2 + (f_{ks})^2 \right]^{1/2}$$

- b) uncertainty due to random errors:

$$f_r = \pm \left[(f_{kr})^2 + (f_l)^2 \right]^{1/2}$$

- c) total uncertainty:

$$f_t = \pm \left[(f_s)^2 + (f_r)^2 \right]^{1/2}$$

F.3 Example of calculation of uncertainty due to systematic errors in the determination of the specific hydraulic energy, mechanical runner power and hydraulic efficiency

F.3.1 General

Using the following methods of measurement as examples, the calculation of uncertainty relating to systematic errors is performed. These uncertainties depend on many factors; therefore, the values assumed hereafter are to be considered only as examples.

F.3.2 Discharge

Measurement by electromagnetic flowmeter. The uncertainty due to systematic errors is estimated equal to $\pm 0,20$ %.

F.3.3 Pressure

At the high and low pressure measuring sections, measurement by absolute pressure transducers. The uncertainty due to systematic errors is estimated for each transducer in F.3.4.

F.3.4 Specific hydraulic energy

In this case, it is given by (see 8.2.3):

$$E = \frac{p_{\text{abs1}} - p_{\text{abs2}}}{\bar{\rho}} + g(z_1 - z_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

If, in a general way, e_X is the absolute uncertainty in the determination of quantity X , and thus, the relative uncertainty is $f_X = e_X / X$, then the relative uncertainty due to systematic errors in the determination of the specific hydraulic energy is given by¹⁰:

$$(f_E)_s = \pm \frac{(e_E)_s}{E} = \pm \left\{ \frac{\left[\left(\frac{e_{p_{\text{abs1}}}}{\bar{\rho}} \right)^2 + \left(\frac{e_{p_{\text{abs2}}}}{\bar{\rho}} \right)^2 + (ge_{z_1})^2 + (ge_{z_2})^2 + (v_1 e_{v_1})^2 + (v_2 e_{v_2})^2 \right]^{0,5}}{\frac{p_{\text{abs1}} - p_{\text{abs2}}}{\bar{\rho}} + g(z_1 - z_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}} + f_{\Delta E} \right\}$$

Assuming that:

$$p_{\text{abs1}} = 10,5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{abs2}} = 0,5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$z_1 = 4 \text{ m}$$

$$z_2 = 2 \text{ m}$$

$$v_1 = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_2 = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{\rho} = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$f_{p_{\text{abs1}}} = \pm 0,1 \%$$

$$f_{p_{\text{abs2}}} = \pm 0,2 \%$$

$$e_{z_1} = \pm 0,01 \text{ m}$$

$$e_{z_2} = \pm 0,01 \text{ m}$$

$$f_{v_1} = \pm 0,2 \%$$

$$f_{v_2} = \pm 0,4 \%$$

¹⁰ In fact, this formula is only an approximation, v_1^2 and v_2^2 are not independent quantities.

and assuming that the uncertainties in the determination of $\bar{\rho}$ and g may be neglected and $f_{\Delta E}$ is zero (see 8.2.3), then:

$$\frac{e_{p_{abs1}}}{\bar{\rho}} = \left(\frac{p_{abs1}}{\bar{\rho}} \right) f_{p_{abs1}} = \pm 10,5 \times \left(\frac{10^5}{10^3} \right) \times \left(\frac{0,1}{100} \right) = \pm 1,05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\frac{e_{p_{abs2}}}{\bar{\rho}} = \left(\frac{p_{abs2}}{\bar{\rho}} \right) f_{p_{abs2}} = \pm 0,5 \times \left(\frac{10^5}{10^3} \right) \times \left(\frac{0,2}{100} \right) = \pm 0,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$ge_{z_1} = \pm 9,81 \times 0,01 = \pm 0,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$ge_{z_2} = \pm 9,81 \times 0,01 = \pm 0,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_1 e_{v_1} = v_1^2 f_{v_1} = \pm 36 \times 0,2 / 100 = \pm 0,072 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_2 e_{v_2} = v_2^2 f_{v_2} = \pm 2,25 \times 0,4 / 100 = \pm 0,009 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

then

$$(f_E)_s = \pm \left\{ \frac{\left[(1,05)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,072)^2 + (0,009)^2 \right]^{0,5}}{(1050 - 50) + 9,81 \times (4 - 2) + \frac{(36 - 2,25)}{2}} \right\} = \pm \frac{1,07}{1037} = \pm 0,1\%$$

In such a case, the relative uncertainty due to systematic errors in the determination of specific hydraulic energy is practically equal to that of the pressure measurements.

F.3.5 Power

Torque measured by the primary method with an uncertainty due to systematic errors of $\pm 0,14\%$, the rotational speed by an electronic counter with an uncertainty due to systematic errors of $\pm 0,075\%$.

The power uncertainty due to systematic errors is estimated as:

$$(f_P)_s = \pm \left[(0,14)^2 + (0,075)^2 \right]^{1/2} = \pm 0,16\%$$

F.3.6 Hydraulic efficiency

By combining the above uncertainties of the measured quantities, the uncertainty due to systematic errors in the determination of hydraulic efficiency is:

$$\left(f_{\eta_h}\right)_s = \pm \frac{\left(e_{\eta_h}\right)_s}{\eta_h} = \pm \left[\left(f_Q\right)_s^2 + \left(f_E\right)_s^2 + \left(f_P\right)_s^2 \right]^{1/2} = \pm \left[(0,2)^2 + (0,1)^2 + (0,16)^2 \right]^{1/2} = \pm 0,27 \%$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

Annex G (normative)

The scale effect on hydraulic efficiency for Pelton turbines

G.1 General

This annex, based on theoretical considerations and experimental data, summarizes the best approximation available at the present time. Research work currently in progress can lead to a more precise knowledge of the scale effect on the efficiency transposition for Pelton turbines. Until these new results are available, it is good practice to apply the transposition formula given in G.3 for the efficiency transposition from a model to the prototype.

G.2 Similarity considerations

As can be shown by dimensional analysis (see appendix A of [18]), the losses in Pelton machines are controlled by five dimensionless parameters:

- the Reynolds number Re (see 3.4.12.1);
- the Froude number Fr (see 3.4.12.2);
- the Weber number We (see 3.4.12.3);
- the speed factor n_{ED} (see 3.4.13.1) or energy coefficient E_{nD} (see 3.4.13.5);
- the specific flow rate φ_B defined as follows (see 3.4.13.6):

$$\varphi_B = \frac{Q_1}{\pi (B/2)^2 (2E)^{0.5} z_j}$$

where

- Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) is the discharge (see 3.4.5.1);
- z_j (-) is the number of nozzles in operation;
- E ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) is the specific hydraulic energy of machine (see 3.4.7.1);
- B (m) is the bucket width (see 3.4.3.4).

For two geometrically similar Pelton turbines (e.g. a prototype machine and a corresponding model machine), the following ratios of similitude numbers can be made:

a) Froude similitude ratio:

$$C_{Fr} = \frac{Fr_P}{Fr_M} = \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{1/2} \times \left(\frac{B_M}{B_P} \right)^{1/2} \times \left(\frac{g_M}{g_P} \right)^{1/2};$$

b) Weber similitude ratio:

$$C_{We} = \frac{We_P}{We_M} = \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{1/2} \left(\frac{B_P}{B_M} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_P}{\rho_M} \right)^{1/2} \left(\frac{\sigma_M^*}{\sigma_P^*} \right)^{1/2}$$

where the surface tension σ^* is determined from Table G.1;

c) Reynolds similitude ratio:

$$C_{Re} = \frac{Re_P}{Re_M} = \left(\frac{E_P}{E_M} \right)^{1/2} \frac{B_P}{B_M} \frac{v_M}{v_P}.$$

These ratios are used to define functions which describe the scale effect on efficiency between two geometrically similar Pelton turbines when operating at the same speed factor n_{ED} or energy coefficient E_{nD} , with the specific flow rate φ_B being the most important parameter for C_{Re} , C_{Fr} and C_{We} . The functions result from the analysis of numerous results of efficiency tests performed with the same model at different test conditions and from comparison of measured efficiencies of prototype and model turbines being fully or partly homologous.

Table G.1 – Numerical data for surface tension σ^*

Temperature θ °C	Surface tension σ^* J·m ⁻²
5	0,074 9
10	0,074 2
15	0,073 5
20	0,072 8
25	0,072 0
30	0,071 2
35	0,069 6

The resulting differences in hydraulic efficiency $\Delta\eta_h$ are presented in Figure G.1 for the influence of Froude number, in Figure G.2 for the influence of Weber number and in Figure G.3 for the influence of Reynolds number.

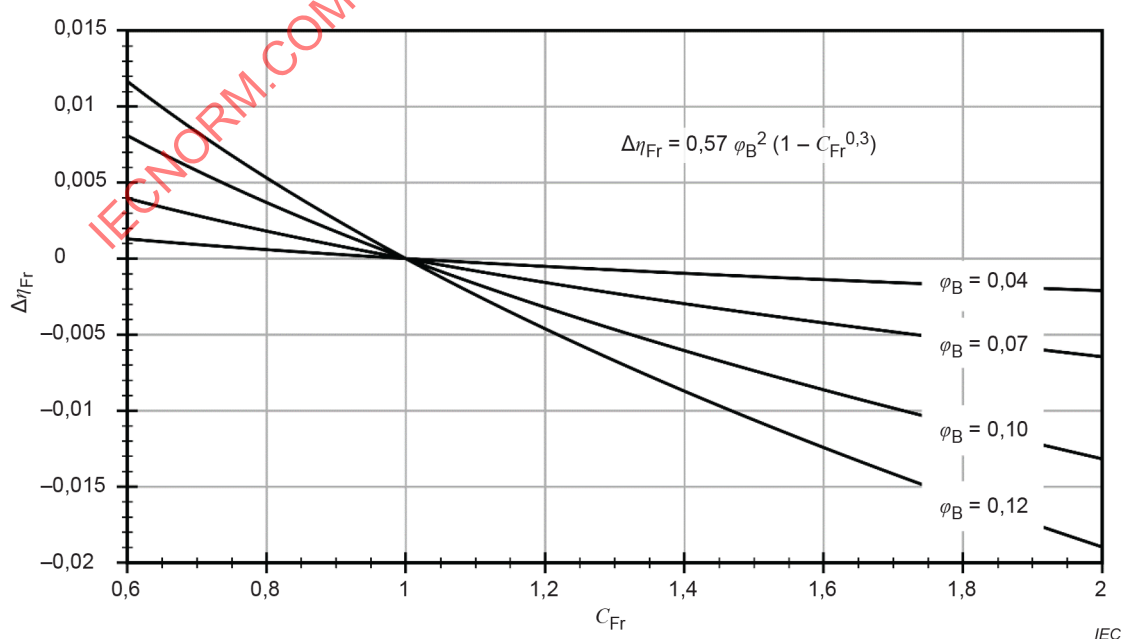


Figure G.1 – Influence of Froude number

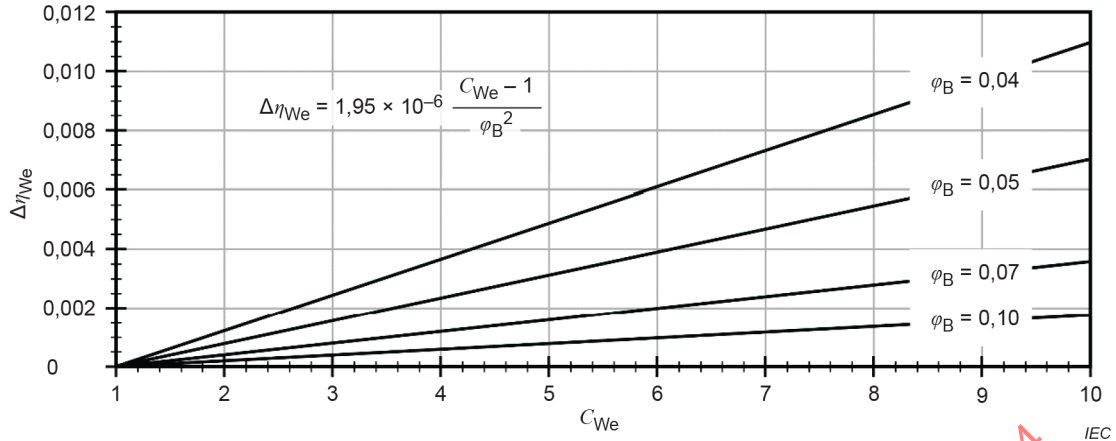


Figure G.2 – Influence of Weber number

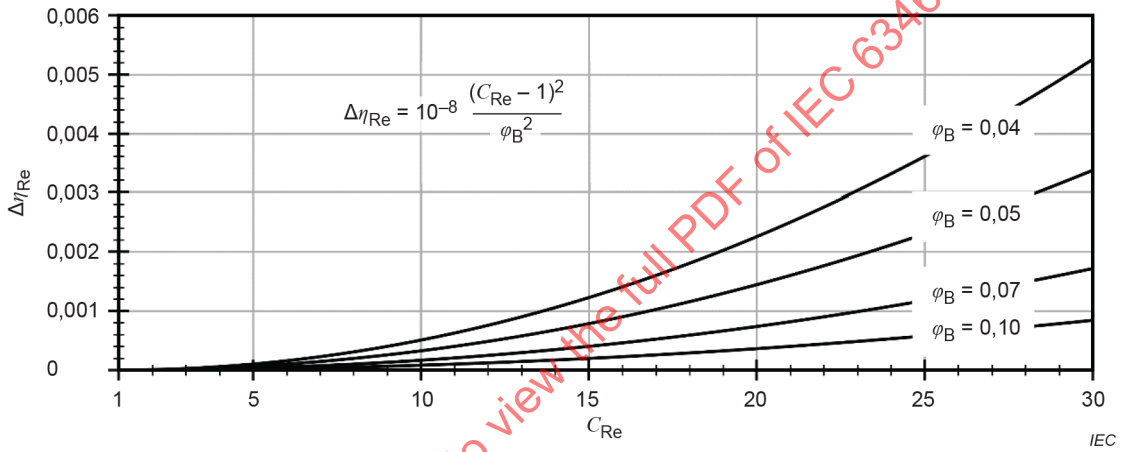


Figure G.3 – Influence of Reynolds number

G.3 Transposition formula

If the guarantees are referred to prototype, the model hydraulic efficiencies η_{hM} are transposed to prototype conditions using the following formula:

$$\Delta\eta_h = \eta_{hP} - \eta_{hM} = \Delta\eta_{Fr} + \Delta\eta_{We} + \Delta\eta_{Re}$$

$$\Delta\eta_h = \eta_{hP} - \eta_{hM} = 5,7\varphi_B^2 \left(1 - C_{Fr}^{0,3}\right) + 1,95 \times 10^{-6} \frac{C_{We} - 1}{\varphi_B^2} + 10^{-8} \frac{(C_{Re} - 1)^2}{\varphi_B^2}$$

Annex H (normative)

Analysis of random errors for a test at constant operating conditions

H.1 General

Repeated measurements at one operating point can be expected to show differences in measurements but their mean value is a better estimate of the true value than any individual measurement. The accuracy of the mean value depends on the number of measurements and their individual deviations from the mean (scatter).

It is possible to calculate statistically the uncertainty in a measurement of a variable when the associated error is purely random in nature. To do this it is necessary to calculate the standard deviation and to decide on the confidence level which shall be attached to the uncertainty. For this document, a 95 % confidence level shall be used.

H.2 Standard deviation

The exact value of standard deviation σ of any measured parameter is rarely known exactly: usually, only an estimate s of σ is available, based on a limited number of observations.

If the error in the measurement of a quantity Y is purely random, then, when n independent measurements of the quantity are made, the standard deviation (defined here as the "estimated standard deviation," see ISO 5168) of the distribution of results s_Y is given by the equation:

$$s_Y = \left[\frac{\sum_{r=1}^n (Y_r - \bar{Y})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

where

$\bar{Y}$ is the arithmetic mean of the n measurements of the variable Y ;

Y_r is the value obtained by the r^{th} measurement of the variable Y ;

n is the total number of measurements of the variable Y .

For brevity, s_Y is normally referred to as "the standard deviation of Y ". The square of the standard deviation s_Y^2 is called "the variance".

The random error in the result can be reduced by making as many measurements as possible of the variable and using the arithmetic mean value, since the standard deviation of the mean of n independent measurements is $\sqrt{n}$ times smaller than the standard deviation of the measurements themselves. Thus, the standard deviation of the mean, $s_{\bar{Y}}$ is given by the equation:

$$s_{\bar{Y}} = \frac{s_Y}{\sqrt{n}}$$

H.3 Confidence levels

If the true standard deviation σ_Y , is known (as n approaches infinity, s_Y approaches σ_Y), the confidence level can be related to the uncertainty of measurements as indicated in Table H.1.

Table H.1 – Confidence levels

Uncertainty	Confidence level
$\pm 0,674\sigma_Y$	0,50
$\pm 0,954\sigma_Y$	0,66
$\pm 1,960\sigma_Y$	0,95
$\pm 2,576\sigma_Y$	0,99

For example, the interval $Y_r \pm 1,96\sigma_Y$ would be expected to contain 95 % of the population. That is to say, where a single measurement of the variable Y is made and where the value of σ_Y is independently known, there would be a probability of 0,05 of the interval $Y_r \pm 1,96\sigma_Y$ not including the true value.

In practice, of course, it is only possible to obtain an estimate of the standard deviation since an infinite number of measurements would be required in order to determine it precisely, and the confidence limits shall be based on this estimate. The Student's "t distribution" for small samples should be used to relate the required confidence level to the interval.

H.4 Student's t distribution

The uncertainty at 95 % confidence level can be found as follows:

- if n is the number of measurements, $(n-1)$ is taken as the number of degrees of freedom, ν ;
- the value of t for the appropriate number of degrees of freedom is read in Table H.2;
- the standard deviation s_Y of the distribution of the measurements of the quantity Y is calculated as stated in H.2;
- the range of values within which any reading would be expected to be with 95 % confidence is

$$\bar{Y} \pm t \times s_Y;$$

- the difference between a new reading and the average of the sample should be less than

$$t \times s_Y \times \sqrt{1 + 1/n};$$

- the range of values within which the true value of the quantity would be expected to lie with 95 % confidence, i.e. the band of uncertainty, is

$$\bar{Y} \pm \frac{t \times s_Y}{\sqrt{n}} = \bar{Y} \pm t \times s_{\bar{Y}}.$$

Table H.2 – Values of Student's t

Degrees of freedom $\nu = n - 1$	Student's t	$\frac{t}{\sqrt{n}}$
For 95 % confidence level		
1	12,706	8,984
2	4,303	2,484
3	3,182	1,591
4	2,776	1,241
5	2,571	1,050
6	2,447	0,925
7	2,365	0,836
8	2,306	0,769
9	2,262	0,715
10	2,228	0,672
11	2,201	0,635
12	2,179	0,604
13	2,160	0,577
14	2,145	0,554
15	2,131	0,533
20	2,086	0,455
30	2,042	0,367
60	2,000	0,256
∞	1,960	0

For other values of ν , t can be computed from the following empirical equation:

$$t = 1,96 + 2,36/\nu + 3,2/\nu^2 + 5,2/\nu^{3,84}$$

H.5 Maximum permissible value of uncertainty due to random errors

If the required range of accepted uncertainty due to random errors associated with $\bar{Y}$ is $\pm e_{r \max}$, then

$$e_r = \frac{t \times s_Y}{\sqrt{n}}$$

should not exceed $e_{r \max}$.

Alternatively, for a value of $e_{r \max}$ associated with the 95 % confidence level, the estimated standard deviation s_Y should not exceed the value of

$$s_{Y \max} = \frac{e_{r \max} \sqrt{n}}{t}$$

For convenience, values of $t/\sqrt{n}$ are given in Table H.2.

The mean value of a series of points which meet the above criteria will be acceptable. Table H.2 applies only to repeated points at constant operating conditions.

H.6 Example of calculation

Table H.3 illustrates the computation of the estimated standard deviation and the uncertainty for $n = 8$ observations of a quantity Y .

Table H.3 – Computation of the estimated standard deviation and the uncertainty for eight observations

Measured values Y_i	$\bar{Y} - Y_i$	$(\bar{Y} - Y_i)^2$
92,80	–0,156 25	0,024 414
92,70	–0,056 25	0,003 164
92,60	+0,043 75	0,001 914
92,50	+0,143 75	0,020 664
92,70	–0,056 25	0,003 164
92,75	–0,106 25	0,011 289
92,50	+0,014 375	0,000 207
92,60	+0,043 75	0,001 914

where

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = 92,643 75$$

$$\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y_i)^2 = 0,087 187 6$$

Estimated standard deviation of the observations:

$$s_Y = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y} - Y_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,087 187 6}{8 - 1}} = 0,111 604$$

The uncertainty due to random errors associated with the mean value at the 95 % confidence level:

$$(e_Y)_r = \pm \frac{t \times s_Y}{\sqrt{n}} = \pm 0,111 604 \times 0,836 = \pm 0,093 3$$

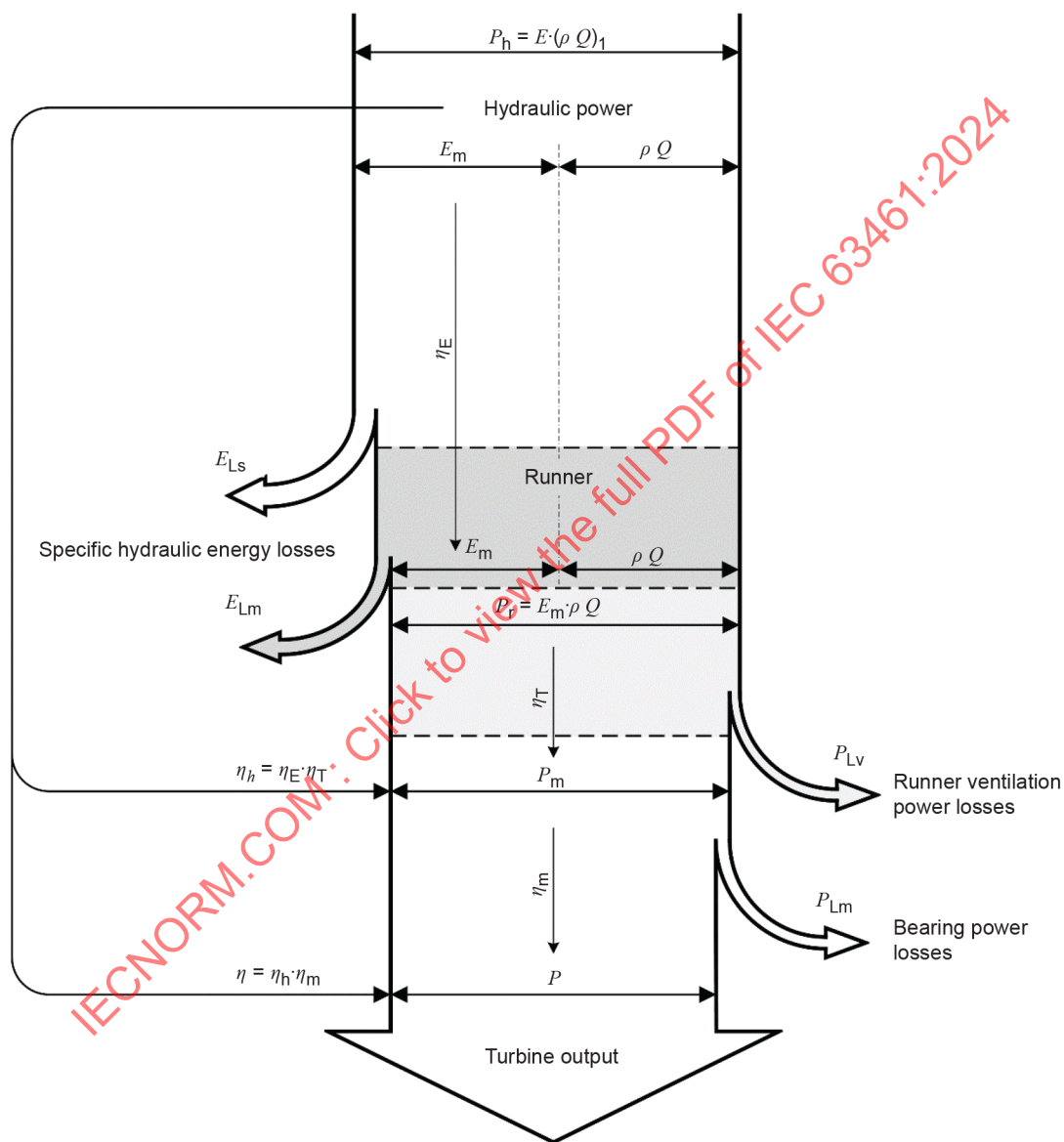
$$(f_Y)_{r95} = \frac{(e_Y)_r}{\bar{Y}} = \pm \frac{0,093 3}{92,643 7} = \pm 0,1 \%$$

In the case of the examined measure being the efficiency, it should then be verified that this value of the observed uncertainty $(f_{\eta})_r$ does not exceed the maximum permissible uncertainty due to random errors agreed prior to the test (see 6.3.2.3.1).

Annex I (informative)

Flux diagram of specific hydraulic energy and power

As a supplement to Figure 4, a more detailed analysis of internal losses in a Pelton turbine is presented in Figure I.1. According to recent publications, this analysis is needed to determine the scale effect on efficiency and power and also on specific hydraulic energy.



IEC

Figure I.1 – Turbine

The following quantities: P , P_h , P_m , P_{Lm} , Q , E , ρ , η , η_h , and η_m are defined in 3.4. Other quantities are defined below:

- P_r is the hydraulic power transmitted from water to the runner;
- E_m is the specific hydraulic energy available for runner to produce power;
- E_{Lm} is the specific hydraulic energy loss in runner;
- E_{Ls} is the specific hydraulic energy loss in stationary parts;
- E_L is the specific hydraulic energy loss between high pressure section and low pressure section of turbine;
- P_{Lv} is the runner ventilation power losses;
- η_E is the specific energy efficiency of runner given by the ratio of E_m/E ;
- η_T is the power efficiency of runner given by the ratio of P_m/P_r .

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

Bibliography

Main text references

The following references are found in the main text except 6.2:

- [1] Herbst, G., Roegenen, H., *Neue kanonische Zustandsgleichung des Wassers*, Fortschritt-Berichte VDI-Z, Reihe 6, Nr. 50 (1977)
- [2] Kell, G.S., Whalley, E., *Re-analysis of the density of liquid water in the range 0 to 150 °C and 0 to 1 kbar*, Communication à la 8e Int. Conf. Prop. Steam, Giens, (1974)
- [3] Kell, G.S., McLaurin, G.E., Whalley, E., *The PVT properties of liquid water in the range of 150 to 350 °C and 0 to 1 kbar*, Communication à la 8e Int. Conf. Prop. Steam, Giens (1974)
- [4] Borel, L., Nguyen Dinh Lan., *Equations of state and Joule. Thomson coefficient*, 10th Int. Conf. Prop. Steam, Moscow (1984)
- [5] Haar, L., Gallagher, J.S., Kell, S.G., *NBS/NRC steam tables: thermodynamic and transport properties, and computer programs for vapor and liquid states of water in SI units*, Hemisphere Publ. Corp. (1984)
- [6] Weber, P., *Bemerkungen zur thermodynamischen Methode der Wirkungsgradbestimmung von Wasserturbinen und Speicherpumpen*. Bulletin des Schweiz. El. techn. Vereins BD. 55 (1964), No. 24, pp. 1199-1208
- [7] Gindroz, B., *Lois de similitude dans les essais de cavitation des turbines Francis*. Thesis No. 914, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne (1991)
- [8] Gindroz, B., Henry, P., Avellan, F., *Similarity of cavitation inception in Francis turbines*. 15th Symposium of the IAHR (Internal Association for Hydraulic Research), Belgrade (1990)
- [9] Brand, F.L., *A physical process for the determination of dissolved and un-dissolved gases in water*. Voith Research and Construction, Vol. 27e (1980), Paper 7
- [10] Kestin, J., Whitelaw, J.H., *Sixth International Conference on the Properties of Steam-Transport Properties of Water Substance*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 88, n.1 (1966), pp 82-104
- [11] *VDI-Wärmeatlas*, VDI Verlag Düsseldorf (2013)
- [12] Landolt, Börnstein, *Zahlenwerte und Funktionen*, Vol. IV, Technik, Part 1 and Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany (1953)
- [13] Kubota, T, Tsukamoto, T., *Calculation of prototype cavitation characteristics in large bulb turbines*, Water Power & Dam Construction, Vol. 40 (1988)
- [14] Kubota, T., Tsukamoto, T., *Scale effect on cavitation runaway speed of large bulb turbine for low head*. 15th Symposium of the IAHR, Belgrade (1990)
- [15] Grubbs, F.E., *Procedures for detecting outlying observations in samples*, Technometrics, Vol. 12, n.1 (1969), pp 1-21

References for fluctuating quantities

The references listed below provide additional information on the topics covered by Subclauses 6.2:

- [16] Bendat J., Piersol A. G., *Random data: analysis and measurements procedures*. New York, John Wiley, 4th edition (2010)
- [17] Heinzl G., Rüdiger A., Schilling R., *Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows*, Max Planck Society, 2002.

References for the scale effect on efficiency for impulse turbines

The references listed below provide additional information on the topics covered by Annex G:

- [18] Grein, H., Meier, J., Klicov, D., *Efficiency scale effects in Pelton turbines*, Proceedings, Vol. II, IAHR Symposium, Montreal, Canada, 1986, paper No. 76
- [19] Grein, H., Klicov, D., Wieser, W., *Efficiency scale effects in Pelton turbines*. Water Power & Dam Construction, May 1988, p. 32
- [20] *Handbook of chemistry and physics*, editor Robert C. West, 58th edition 1977-78, CRC Press Inc., Cleveland, Ohio

Informative standard references

- [21] IEC 60041:1991, *Field acceptance test to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*
- [22] IEC 60609-1:2004, *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Cavitation pitting evaluation – Part 1: Evaluation in reaction turbines, storage pumps and pump-turbines*
- [23] IEC 60609-2:1997, *Cavitation pitting evaluation in hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Part 2: Evaluation in Pelton turbines*
- [24] IEC 60994:1991, *Guide for field measurement of vibrations and pulsations in hydraulic machines (turbines, storage pumps and pump-turbines)*
- [25] IEC TR 61364:1999, *Nomenclature for hydroelectric powerplant machinery*
- [26] IEC 61366 (all parts), *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Tendering documents*
- [27] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [28] ISO 1438:2017, *Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs*
- [29] ISO 4006:1991, *Measurement of fluid flow in closed conduits – Vocabulary and symbols*
- [30] ISO 4373:2022, *Hydrometry – Water level measuring devices*

- [31] ISO 5167-1:2022, *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements*
- [32] ISO 5168:2005, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*
- [33] ISO 20456:2017, *Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance for the use of electromagnetic flowmeters for conductive liquids*
- [34] ISO TR 7066-1:1997¹¹, *Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices – Part 1: Linear calibration relationships*
- [35] ISO 7066-2:1988, *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices – Part 2: Non-linear calibration relationships*
- [36] ISO 80000-4:2019, *Quantities and units – Part 4: Mechanics*
- [37] ISO 80000-11:2019, *Quantities and units – Part 11: Characteristic numbers*
- [38] NIST FIPS 180-4:2015, *Security Hash Standard (SHS)*
- [39] NIST FIPS 202:2015, *SHA-3 Standard: Permutation-Based Hash and Extendable-Output Functions*
- [40] ISO 21920-2:2021, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*
- [41] ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*
- [42] IEC 60609 (all parts), *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Cavitation pitting evaluation*
- [43] ISO/IEC 99:2007, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

¹¹ Withdrawn.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	179
1 Domaine d'application	181
2 Références normatives	182
3 Termes, définitions, symboles et unités	182
3.1 Généralités	182
3.2 Termes et définitions	182
3.3 Unités	184
3.4 Termes, définitions, symboles et unités	185
3.4.1 Liste par thème.....	185
3.4.2 Indices et symboles	186
3.4.3 Configurations	187
3.4.4 Grandeurs et propriétés physiques	189
3.4.5 Débit, vitesse d'écoulement et vitesse de rotation.....	190
3.4.6 Pression	191
3.4.7 Énergie massique	191
3.4.8 Hauteur géométrique et hauteur de charge	191
3.4.9 Puissance et couple	192
3.4.10 Rendement.....	194
3.4.11 Grandeurs fluctuantes	194
3.4.12 Dynamique des fluides et mise à l'échelle.....	197
3.4.13 Termes et définitions adimensionnels	197
3.4.14 Données de performance supplémentaires	198
4 Propriétés physiques	198
4.1 Généralités	198
4.2 Accélération due à la pesanteur	198
4.3 Propriétés physiques de l'eau	199
4.3.1 Masse volumique de l'eau	199
4.3.2 Viscosité cinématique	202
4.3.3 Pression de vapeur.....	203
4.4 Conditions physiques de l'atmosphère	203
4.4.1 Masse volumique de l'air sec.....	203
4.4.2 Pression ambiante	203
4.5 Masse volumique du mercure.....	203
5 Exigences d'essai.....	204
5.1 Exigences relatives à l'installation d'essai et au modèle d'essai.....	204
5.1.1 Choix du laboratoire	204
5.1.2 Exigences relatives à l'installation d'essai	204
5.1.3 Exigences relatives au modèle d'essai.....	205
5.2 Contrôle dimensionnel du modèle et du prototype	208
5.2.1 Généralités.....	208
5.2.2 Explication des termes utilisés pour le modèle et le prototype	208
5.2.3 Objectif des contrôles dimensionnels.....	209
5.2.4 Règles générales.....	209
5.2.5 Procédure.....	209
5.2.6 Méthodes	211
5.2.7 Exactitude des mesurages.....	214
5.2.8 Dimensions du modèle et du prototype à vérifier.....	215

5.2.9	Écart maximaux admissibles de la similitude géométrique entre le prototype et le modèle	216
5.2.10	Ondulation et rugosité de surface	217
5.3	Procédures d'essai	220
5.3.1	Organisation des essais	220
5.3.2	Inspections et étalonnages	222
5.3.3	Exécution des essais	224
5.3.4	Défauts et répétition des essais	228
5.3.5	Rapport d'essai préliminaire	229
5.3.6	Rapport d'essai final	229
6	Acquisition des données	230
6.1	Acquisition et traitement des données	230
6.1.1	Généralités	230
6.1.2	Exigences générales	231
6.1.3	Acquisition des données	231
6.1.4	Exigences relatives aux composants	233
6.1.5	Contrôle du système d'acquisition de données	236
6.2	Acquisition et traitement des données pour le mesurage des grandeurs fluctuantes	238
6.2.1	Généralités	238
6.2.2	Acquisition des données	239
6.2.3	Traitement des données	242
6.3	Analyse des erreurs	242
6.3.1	Définitions	242
6.3.2	Détermination des incertitudes dans les essais sur modèle	244
7	Méthodes de mesure	249
7.1	Mesurage du débit	249
7.1.1	Généralités	249
7.1.2	Choix de la méthode de mesure	250
7.1.3	Exactitude des mesurages	250
7.1.4	Méthodes primaires	251
7.1.5	Méthodes secondaires	252
7.2	Mesurage de la pression	255
7.2.1	Généralités	255
7.2.2	Choix de la section de mesure de la pression	256
7.2.3	Prises de pression et conduites de raccordement	256
7.2.4	Appareils de mesure de la pression	259
7.2.5	Étalonnage de l'appareillage de mesure de la pression	266
7.2.6	Mesurages de vide	267
7.2.7	Incertaince de mesure de la pression	267
7.3	Mesurage du niveau d'eau libre (voir aussi l'ISO 4373)	268
7.3.1	Généralités	268
7.3.2	Choix des sections de mesure du niveau d'eau	268
7.3.3	Nombre de points de mesure dans une section de mesure	268
7.3.4	Méthodes de mesure	268
7.3.5	Incertaince de mesure du niveau d'eau libre	270
7.4	Mesurage du couple de l'arbre	270
7.4.1	Généralités	270
7.4.2	Méthodes de mesure du couple	271

7.4.3	Méthodes d'absorption/génération de puissance.....	271
7.4.4	Disposition du montage	272
7.4.5	Vérification du système.....	276
7.4.6	Étalonnage	276
7.4.7	Incertitude de mesure du couple (avec un niveau de confiance de 95 %).....	277
7.5	Mesurage de la vitesse de rotation.....	278
7.5.1	Généralités	278
7.5.2	Méthodes de mesure de la vitesse	278
7.5.3	Vérification	278
7.5.4	Incertitude de mesure	279
8	Exécution des essais et résultats.....	279
8.1	Généralités	279
8.2	Détermination de E	279
8.2.1	Généralités	279
8.2.2	Détermination de l'énergie hydraulique massique E	280
8.2.3	Formules simplifiées pour E	283
8.3	Détermination de la puissance et du rendement.....	285
8.3.1	Puissance hydraulique.....	285
8.3.2	Puissance mécanique	285
8.3.3	Rendement hydraulique	285
8.4	Similitude hydraulique.....	286
8.4.1	Exigences théoriques de base et nombres de similitude	286
8.4.2	Conditions de similitude hydraulique utilisées dans le présent document	287
8.4.3	Exigences de similitude pour les différents types d'essais sur modèle	287
8.4.4	Similitude de Reynolds	288
8.4.5	Similitude de Froude.....	288
8.4.6	Autres conditions de similitude - Nombre de Weber	288
8.5	Conditions d'essai.....	288
8.5.1	Détermination des conditions d'essai	288
8.5.2	Valeurs minimales pour la taille du modèle et les conditions d'essai à satisfaire.....	289
8.5.3	Stabilité et fluctuations pendant les mesurages	290
8.5.4	Ajustement du point de fonctionnement	290
8.6	Calcul et présentation des résultats d'essai	290
8.6.1	Généralités	290
8.6.2	Puissance, débit et rendement dans la plage de garantie	291
8.6.3	Calcul de la vitesse et du débit d'emballement stabilisé.....	295
9	Nature et étendue des garanties de performances hydrauliques	297
9.1	Généralités	297
9.1.1	Données de conception et coordination	297
9.1.2	Définition des garanties de performances hydrauliques	297
9.1.3	Garanties des grandeurs corrélées	298
9.1.4	Forme des garanties	298
9.2	Principales garanties de performance hydraulique vérifiables par essai sur modèle.....	298
9.2.1	Grandeurs garanties pour une machine	298
9.2.2	Application spécifique	299
9.3	Garanties non vérifiables par essai sur modèle	299
9.3.1	Garanties relatives à l'érosion de cavitation.....	299

9.3.2	Garanties relatives à la survitesse instantanée maximale et à l'augmentation instantanée maximale de la pression	299
9.3.3	Garanties concernant le bruit et les vibrations	299
9.3.4	Mesurages non couverts par la présente norme	299
9.4	Comparaison avec les garanties	299
9.4.1	Généralités	299
9.4.2	Courbe d'interpolation et largeur de bande d'incertitude totale	300
9.4.3	Puissance, débit et/ou énergie hydraulique massique et rendement dans la plage de garantie	301
9.4.4	Pertes mécaniques du prototype	302
9.4.5	Vitesse et débit d'emballement	302
9.4.6	Pénalité et prime	302
10	Données de performance supplémentaires – Méthodes de mesure et résultats	303
10.1	Mesurage des données supplémentaires	303
10.1.1	Généralités	303
10.1.2	Conditions et procédures d'essai	304
10.1.3	Incertitude de mesure	304
10.1.4	Conversion du modèle en prototype	304
10.2	Charges hydrauliques sur les organes de commande	305
10.2.1	Généralités	305
10.2.2	Force du pointeau et couple du déflecteur Pelton	306
10.3	Influence du niveau aval	309
10.4	Essais dans une plage de fonctionnement étendue	309
10.4.1	Généralités	309
10.4.2	Domaine d'application des essais	310
10.4.3	Méthodes d'essai dans la plage de fonctionnement étendue	310
10.5	Mesurage de la pression différentielle pour l'essai indiciel sur le prototype	311
10.5.1	Généralités	311
10.5.2	Objectif de l'essai	311
10.5.3	Exécution de l'essai	312
10.5.4	Analyse des résultats d'essai	312
10.5.5	Transposition aux conditions du prototype	313
10.5.6	Incertitude	313
10.6	Étalonnage du débit de l'injecteur pour l'essai indiciel sur le prototype	314
Annexe A (informative)	Termes adimensionnels	315
Annexe B (normative)	Propriétés physiques, données	317
Annexe C (informative)	Résumé de la procédure d'essai et de calcul	325
C.1	Généralités	325
C.2	Accords à conclure avant les essais	325
C.3	Modèle, installation d'essai et instrumentation	326
C.3.1	Fabrication du modèle et contrôles dimensionnels	326
C.3.2	Instrumentation de l'installation d'essai et système d'acquisition de données	326
C.4	Essais et calcul des valeurs du modèle	326
C.4.1	Types d'essais	326
C.4.2	Mesurage des principales grandeurs pendant l'essai	326
C.4.3	Incertitude des grandeurs mesurées	327
C.4.4	Calcul des grandeurs liées aux performances hydrauliques principales	327

C.4.5	Calcul des facteurs ou coefficients adimensionnels et du nombre de Thoma	327
C.5	Calcul des grandeurs du prototype.....	327
C.6	Représentation graphique des résultats du modèle ou du prototype.....	328
C.7	Comparaison avec les garanties	328
C.8	Protocole final.....	328
C.9	Rapport d'essai final	328
Annexe D (normative) Calcul des caractéristiques d'emballage du prototype en tenant compte des pertes par frottement et par ventilation de l'appareil		329
Annexe E (informative) Exemple de détermination de la meilleure courbe lisse: méthode des segments distincts		330
E.1	Généralités	330
E.2	Principe de la méthode	330
E.3	Choix de la largeur minimale des intervalles	332
E.4	Détermination des intervalles.....	332
Annexe F (informative) Exemples d'analyse des sources d'erreur et d'évaluation de l'incertitude		333
F.1	Généralités	333
F.2	Exemple d'analyse des sources d'erreur et d'évaluation de l'incertitude dans le mesurage d'une grandeur physique.....	333
F.2.1	Généralités.....	333
F.2.2	Erreurs survenant lors de l'étalonnage.....	334
F.2.3	Erreurs survenant au cours des essais	335
F.3	Exemple de calcul de l'incertitude due aux erreurs systématiques dans la détermination de l'énergie hydraulique massique, de la puissance mécanique de la roue et du rendement hydraulique	336
F.3.1	Généralités.....	336
F.3.2	Débit	336
F.3.3	Pression	336
F.3.4	Énergie hydraulique massique.....	336
F.3.5	Puissance.....	337
F.3.6	Rendement hydraulique.....	338
Annexe G (normative) Effet d'échelle sur le rendement hydraulique des turbines Pelton		339
G.1	Généralités	339
G.2	Considérations relatives à la similitude	339
G.3	Formule de transposition.....	341
Annexe H (normative) Analyse des erreurs aléatoires lors d'un essai dans des conditions de fonctionnement constantes		342
H.1	Généralités	342
H.2	Écart-type	342
H.3	Niveaux de confiance.....	343
H.4	Loi de t de Student.....	343
H.5	Valeur maximale admissible de l'incertitude due aux erreurs aléatoires	344
H.6	Exemple de calcul.....	345
Annexe I (informative) Bilan schématique de l'énergie hydraulique massique et de la puissance		346
Bibliographie.....		348

Figure 1 – Représentation schématique d'une machine Pelton.....	187
---	-----

Figure 2 – Diamètre de référence et largeur de l'auget	188
Figure 3 – Niveau de référence d'une machine Pelton	192
Figure 4 – Bilan schématique des puissances.....	193
Figure 5 – Représentation de quelques définitions relatives aux grandeurs oscillantes	196
Figure 6 – Accélération due à la pesanteur g ($m \cdot s^{-2}$)	199
Figure 7 – Masse volumique de l'eau distillée ρ_{wd} ($kg \cdot m^{-3}$)	202
Figure 8 – Exemple de limites d'homologie pour les parties mouillées d'une turbine Pelton verticale	206
Figure 9 – Exemple de limites d'homologie pour les parties mouillées d'une turbine Pelton horizontale	207
Figure 10 – Procédure de contrôle dimensionnel, de comparaison des résultats "acier contre acier" et d'application des tolérances pour le modèle et le prototype	210
Figure 11 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à vérifier sur le distributeur et le corps des machines à arbre vertical et horizontal.....	212
Figure 12 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à vérifier sur les augets et les injecteurs	213
Figure 13 – Définition de l'ondulation et de la rugosité de surface.....	219
Figure 14 – Système d'acquisition de données à multiplexage temporel	232
Figure 15 – Système d'acquisition de données à bus	232
Figure 16 – Temporisation	234
Figure 17 – Caractéristiques d'affaiblissement des filtres passe-bas typiques	234
Figure 18 – Différentes chaînes de mesure et leurs points de contrôle recommandés	237
Figure 19 – Système typique d'acquisition de données	239
Figure 20 – Réponse en fréquence d'un filtre analogique anti-repliement de spectre	240
Figure 21 – Exemple de courbe d'étalonnage	245
Figure 22 – Exemples de prises de pression.....	257
Figure 23 – Types de collecteurs de pression	258
Figure 24 – Manomètre à poids avec compensation par transducteur de pression ou de force (exemple de montage expérimental)	264
Figure 25 – Balance à pression (exemple de montage expérimental)	265
Figure 26 – Bassin de tranquillisation	269
Figure 27 – Limnimètres à pointe et à crochet.....	269
Figure 28 – Montage en équilibre.....	273
Figure 29 – Montage en équilibre avec deux cadres distincts.....	273
Figure 30 – Montage avec des paliers et joints (de la machine) en déséquilibre.....	274
Figure 31 – Montage utilisant un couplemètre.....	274
Figure 32 – Montage utilisant un couplemètre avec des paliers et joints (de la machine) en équilibre.....	275
Figure 33 – Montage utilisant un couplemètre avec des paliers et joints (de la machine) en déséquilibre	275
Figure 34 – Exemple présentant les élévations, hauteurs et niveaux de référence principaux du banc d'essai et de la machine modèle	281
Figure 35 – Turbines Pelton à axe horizontal: détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine	284
Figure 36 – Turbine Pelton: colline de rendement indiquant la performance (exemple d'une machine à six injecteurs).....	291

Figure 37 – Surface tridimensionnelle du rendement hydraulique et courbes de performance à E_{nD} constant.....	293
Figure 38 – Courbes d'emballement d'une turbine Pelton à six injecteurs	295
Figure 39 – Vitesse d'emballement déterminée par extrapolation.....	296
Figure 40 – Rendement hydraulique mesuré par rapport au point de garantie	300
Figure 41 – Comparaison entre garanties et mesurages	301
Figure 42 – Courbes de vitesse et de débit d'emballement de la turbine Pelton: comparaison entre garanties et mesurages.....	302
Figure 43 – Facteur de force du pointeau Pelton en fonction de la course relative du pointeau	308
Figure 44 – Exemple d'emplacement de prise de pression pour l'essai indiciel	312
Figure 45 – Exemple de représentation graphique des données de l'essai indiciel	313
Figure D.1 – Détermination de la vitesse maximale d'emballement du prototype en tenant compte des pertes par frottement et par ventilation de l'appareil	329
Figure E.1 – Principe de la méthode des segments distincts	331
Figure E.2 – Exemple de détermination des intervalles	331
Figure G.1 – Influence du nombre de Froude	340
Figure G.2 – Influence du nombre de Weber.....	341
Figure G.3 – Influence du nombre de Reynolds.....	341
Figure I.1 – Turbine	346
Tableau 1 – Coefficients de la formule de Herbst et Roeger	201
Tableau 2 – Écarts maximaux admissibles.....	216
Tableau 3 – Rugosité de surface maximale recommandée pour le prototype Ra	220
Tableau 4 – Récapitulatif des erreurs qui déterminent l'incertitude totale de mesure.....	246
Tableau 5 – Exemples de montage expérimental de manomètres à colonne liquide	261
Tableau 6 – Nomenclature pour la Figure 28 à la Figure 33	272
Tableau 7 – Nombres de similitude	287
Tableau 8 – Conditions de similitude pour les différents types d'essais sur modèle	288
Tableau 9 – Valeurs minimales pour la taille du modèle et les paramètres d'essai	289
Tableau 10 – Variables définissant le point de fonctionnement d'une machine.....	291
Tableau A.1 – Termes adimensionnels	316
Tableau B.1 – Accélération due à la pesanteur g ($m \cdot s^{-2}$)	317
Tableau B.2 – Masse volumique de l'eau distillée ρ_{wd} ($kg \cdot m^{-3}$)	318
Tableau B.3 – Viscosité cinématique de l'eau distillée ν ($m^2 \cdot s^{-1}$)	320
Tableau B.4 – Pression de vapeur de l'eau distillée p_{va} (Pa)	321
Tableau B.5 – Masse volumique de l'air sec ρ_a ($kg \cdot m^{-3}$).....	322
Tableau B.6 – Pression ambiante p_{amb} (Pa)	323
Tableau B.7 – Masse volumique du mercure ρ_{Hg} ($kg \cdot m^{-3}$).....	324
Tableau G.1 – Données numériques pour la tension superficielle σ^*	340
Tableau H.1 – Niveaux de confiance.....	343
Tableau H.2 – Valeurs du t de Student.....	344
Tableau H.3 – Calcul de l'écart-type estimé et de l'incertitude pour huit observations	345

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**TURBINES PELTON –
ESSAIS DE RÉCEPTION SUR MODÈLE****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété. À la date de publication du présent document, l'IEC n'a reçu aucune déclaration relative à des droits de brevets, qui pourraient être exigés pour la mise en œuvre du présent document. Toutefois, il est rappelé aux responsables de cette mise en œuvre qu'il ne s'agit peut-être pas des informations les plus récentes, qui peuvent être obtenues dans la base de données disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 63132 a été établie par le comité d'études 4 de l'IEC: Turbines hydrauliques. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette première édition de l'IEC 63461 annule et remplace la troisième édition de l'IEC 60193 parue en 2019. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) les exigences spécifiques aux turbines Pelton ont été supprimées ;
- b) la nouvelle norme est publiée comme norme indépendante.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
4/460/CDV	4/483/RVC

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

TURBINES PELTON – ESSAIS DE RÉCEPTION SUR MODÈLE

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique aux essais de modèles de laboratoire de tout type de turbine Pelton.

Il s'applique aux modèles de machines prototypes d'une puissance unitaire supérieure à 5 MW. L'application intégrale des procédures décrites dans le présent document ne se justifie généralement pas pour les machines de puissance inférieure. Néanmoins, le présent document peut être utilisé pour de telles machines après accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Le présent document exclut toutes les questions d'intérêt purement commercial, sauf celles inextricablement liées au déroulement des essais.

Le présent document ne concerne ni les dispositions constructives des machines ni les propriétés mécaniques de leurs composants, pour autant qu'elles n'affectent pas les performances du modèle ou la relation entre les performances du modèle et celles du prototype.

Le présent document régit les modalités des essais de réception sur modèle à réaliser sur les turbines Pelton pour déterminer si les principales garanties du contrat de performance hydraulique (voir le 9.2) sont satisfaites.

Il fixe les règles de conduite de ces essais et spécifie les mesures à prendre en cas de contestation d'une phase quelconque des essais.

Les principaux objectifs du présent document sont les suivants:

- définir les termes et les grandeurs utilisés;
- spécifier les méthodes d'essai et de mesure des grandeurs concernées, afin de déterminer les performances hydrauliques du modèle;
- spécifier les méthodes de calcul des résultats et de comparaison avec les garanties;
- déterminer si les garanties contractuelles qui relèvent du domaine d'application du présent document sont respectées;
- définir l'étendue, le contenu et la structure du rapport final.

Les garanties peuvent être données de l'une des manières suivantes:

- garanties pour les performances hydrauliques du prototype, calculées à partir des résultats des essais sur modèle en prenant en considération les effets d'échelle;
- garanties pour les performances hydrauliques du modèle.

En outre, des données de performance supplémentaires (voir l'Article 10) peuvent être nécessaires pour la conception ou le fonctionnement du prototype de la machine hydraulique. Contrairement aux exigences de l'Article 8 relatives aux performances hydrauliques principales, les informations relatives à ces données supplémentaires fournies dans l'Article 10 sont considérées uniquement comme des recommandations ou conseils à l'intention de l'utilisateur (voir le 10.1).

Des essais de réception sur modèle sont effectués si les conditions de terrain prévues pour les essais de réception (voir l'IEC 60041:1991) ne permettent pas de vérifier les garanties données pour la machine prototype.

Il importe de clairement définir la méthode de conversion des performances du modèle au prototype dans le contrat de performances hydrauliques principales.

Le présent document peut également s'appliquer aux essais sur modèle à d'autres fins, c'est-à-dire aux essais comparatifs et aux travaux de recherche et de développement.

Lorsque des essais de réception sur modèle ont été effectués, les essais sur place peuvent être limités à des essais indicatifs (voir l'IEC 60041:1991).

En cas de contradiction entre le présent document et tout autre document, le présent document prévaut.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 2186:2007, *Fluid flow in closed conduits – Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements* (disponible en anglais seulement)

ISO 2533:1975, *Atmosphère type*

ISO 4185:1980, *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par pesée*

ISO 8316:1987, *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par jaugeage d'un réservoir volumétrique*

3 Termes, définitions, symboles et unités

3.1 Généralités

Pour les besoins du présent document, les termes, les définitions, les symboles et les unités suivants s'appliquent. Les termes spécialisés sont définis là où ils apparaissent.

Toute clarification d'un terme, d'une définition ou d'une unité de mesure doit faire l'objet d'un accord écrit entre les parties contractantes avant l'essai.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.2 Termes et définitions

3.2.1 point

valeur établie par une ou plusieurs séries consécutives de lectures ou d'enregistrements dans des conditions de fonctionnement inchangées et avec des réglages inchangés, suffisante pour calculer les performances de la machine dans ces conditions de fonctionnement et avec ces réglages

3.2.2**essai**

ensemble de points et de résultats qui permet d'établir les performances de la machine dans une plage spécifiée de conditions de fonctionnement

3.2.3**performances hydrauliques**

tous les paramètres de performance attribuables à la machine en raison des effets hydrodynamiques

3.2.4**données supplémentaires**

sous-ensemble de données de performance hydraulique qui peuvent être déterminées à titre d'information sur le modèle (voir l'Article 10)¹

3.2.5**garantie**

données de performance spécifiées convenues par contrat

3.2.6**mesurande**

grandeur soumise à mesurage

3.2.7**transducteur**

appareil de mesure qui fournit une grandeur de sortie ayant une relation donnée avec la grandeur d'entrée

3.2.8**transducteur à sortie numérisée**

appareil de mesure équipé d'une électronique intégrée qui permet de fournir une sortie numérisée

Exemple Port série RS 232.

3.2.9**multiplexeur****MUX**

appareil qui permet de commuter deux signaux ou plus afin de partager le même convertisseur analogique-numérique, le même compteur de fréquence ou les mêmes installations de câblage

3.2.10**convertisseur analogique-numérique****convertisseur A/N**

appareil qui convertit des signaux analogiques continus en signaux numériques discrets

3.2.11**compteur**

appareil qui mesure la fréquence, la durée ou le nombre d'impulsions

¹ Toutefois, la prédiction des données prototypes correspondantes est moins exacte que celle qui peut être réalisée pour les données principales de performance hydraulique, en raison de l'application de règles de similitude approximatives.

3.2.12

convertisseur de tension en fréquence

convertisseur T/F

appareil qui traduit les niveaux de tension en fréquence avec une relation donnée

3.2.13

repliement spectral

signaux parasites de basse fréquence (alias) produits par le processus d'échantillonnage, qui ne peuvent être distingués du signal d'origine, lors de l'échantillonnage de signaux analogiques avec une fréquence d'échantillonnage inférieure au double de la fréquence du signal ou de la composante de bruit de fréquence la plus élevée ("fréquence de Nyquist")

3.2.14

interface d'ordinateur

accès de communication qui permet à l'ordinateur de commander et de communiquer avec d'autres appareils compatibles

3.3 Unités

Le Système International d'unités (SI, voir l'ISO 80000-4) est utilisé tout au long du présent document.

Tous les termes sont donnés en unités de base SI ou en unités cohérentes dérivées². Les équations de base sont valables quand ces unités sont utilisées. Cela ne doit pas être perdu de vue lorsque, pour certaines grandeurs, des unités SI autre que cohérentes sont utilisées (par exemple, kilowatt au lieu de watt pour la puissance, kilopascal ou bar au lieu de pascal pour la pression, min^{-1} au lieu de s^{-1} pour la vitesse de rotation, etc.). Les températures peuvent être données en degrés Celsius puisque les températures absolues (en kelvins) sont rarement exigées.

Tout autre système d'unités peut être utilisé à la seule condition que les parties contractantes en aient ainsi convenu par écrit.

L'unité de masse (kg) étant l'une des unités de base du Système International. L'énergie par unité de masse, appelée "énergie massique", est utilisée dans le présent document comme grandeur fondamentale, et non l'énergie par unité locale de poids, c'est-à-dire la "hauteur de charge", qui était exclusivement utilisée dans les publications précédentes.

Cette dernière grandeur ("hauteur de charge") présente l'inconvénient que le poids est une force qui dépend de la valeur locale de l'accélération due à la pesanteur g , lequel varie principalement avec la latitude et aussi avec l'altitude. Néanmoins, le terme "hauteur de charge" continue d'être employé en raison de son usage très général. Il est donc présenté ci-après deux listes de termes relatifs à l'énergie, l'une dans le 3.4.7 sous forme d'énergie massique et l'autre en 3.4.8 sous forme de hauteur de charge. Les termes correspondants ne diffèrent que par le facteur g , valeur locale de l'accélération due à la pesanteur.

² $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ $\text{W} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

3.4 Termes, définitions, symboles et unités

3.4.1 Liste par thème

Paragraphe	Titre
3.4.2	Indices et symboles
3.4.3	Termes géométriques
3.4.4	Grandeurs et propriétés physiques
3.4.5	Termes relatifs au débit, à la vitesse d'écoulement et à la vitesse de rotation
3.4.6	Termes relatifs à la pression
3.4.7	Termes relatifs à l'énergie massique
3.4.8	Termes relatifs à la hauteur géométrique et à la hauteur de charge
3.4.9	Termes relatifs à la puissance et au couple
3.4.10	Termes relatifs au rendement
3.4.11	Termes généraux relatifs aux grandeurs fluctuantes
3.4.12	Termes relatifs à la dynamique des fluides et à la mise à l'échelle
3.4.13	Termes adimensionnels
3.4.14	Termes relatifs à des données de performance supplémentaires

3.4.2 Indices et symboles

Paragraphe	Terme	Définition	Indice ou symbole
3.4.2.1	Section de référence haute pression	Section côté haute pression de la machine par rapport à laquelle les performances garanties sont définies (voir la Figure 1)	1
3.4.2.2	Section de référence basse pression ^{a)}	Section côté basse pression de la machine par rapport à laquelle les performances garanties sont définies	2
3.4.2.3	Sections de mesure haute pression	Sections haute pression de la machine utilisées pour les mesurages Note 1 à l'article: Dans la mesure du possible, il convient que ces sections coïncident avec la section 2; sinon, les valeurs mesurées doivent être ajustées par rapport à la section 1 (voir le 8.2.2.1.3)	1', 1''.
3.4.2.4	Sections de mesure basse pression	Sections côté basse pression de la machine utilisées pour les mesurages Note 1 à l'article: Dans la mesure du possible, il convient que ces sections coïncident avec la section 2; sinon, les valeurs mesurées doivent être ajustées par rapport à la section 2 (voir le 8.2.2.1.3)	2', 2''.
3.4.2.5	Spécifié	Indice qui désigne les valeurs de grandeurs telles que la vitesse de rotation, le débit, etc. pour lesquelles d'autres grandeurs sont garanties	sp
3.4.2.6	Maximal/minimal	Indice qui désigne la valeur maximale ou minimale d'une grandeur quelconque	max min
3.4.2.7	Limites	Valeurs contractuellement définies: – à ne pas dépasser – à atteindre	//// — □ or ////
3.4.2.8	Prototype	Indice qui désigne les valeurs relatives à la machine grandeur nature	P
3.4.2.9	Modèle	Indice qui désigne les valeurs relatives au modèle	M
3.4.2.10	Référence	Indice qui désigne les valeurs relatives à une condition de référence spécifiée	ref
3.4.2.11	Optimal	Indice qui désigne le meilleur point de rendement	opt
3.4.2.12	Ambiant	Indice qui renvoie aux conditions atmosphériques environnantes	amb
3.4.2.13	Amenagement	Indice qui désigne des valeurs relatives aux conditions de fonctionnement du prototype dans l'aménagement	pl
3.4.2.14	Emballlement	Indice qui renvoie aux conditions d'emballlement	R
3.4.2.15	Auget de roue	Indice qui renvoie à l'auget de la roue d'une machine.	B
3.4.2.16	Déflexeur Pelton	Indice qui renvoie au déflexeur Pelton d'une machine	D
3.4.2.17	Pointeau Pelton	Indice qui renvoie au pointeau Pelton d'une machine	N
3.4.2.18	Coordonnées cartésiennes	Indice qui renvoie aux coordonnées de la machine	x, y, z
3.4.2.19	Valeur théorique	Indice qui renvoie à la valeur théorique	th
3.4.2.20	Hydraulique	Indice qui renvoie à la valeur hydraulique	h

^{a)} La section basse pression est nécessaire dans le cas d'une turbine Pelton fonctionnant avec un carter pressurisé.

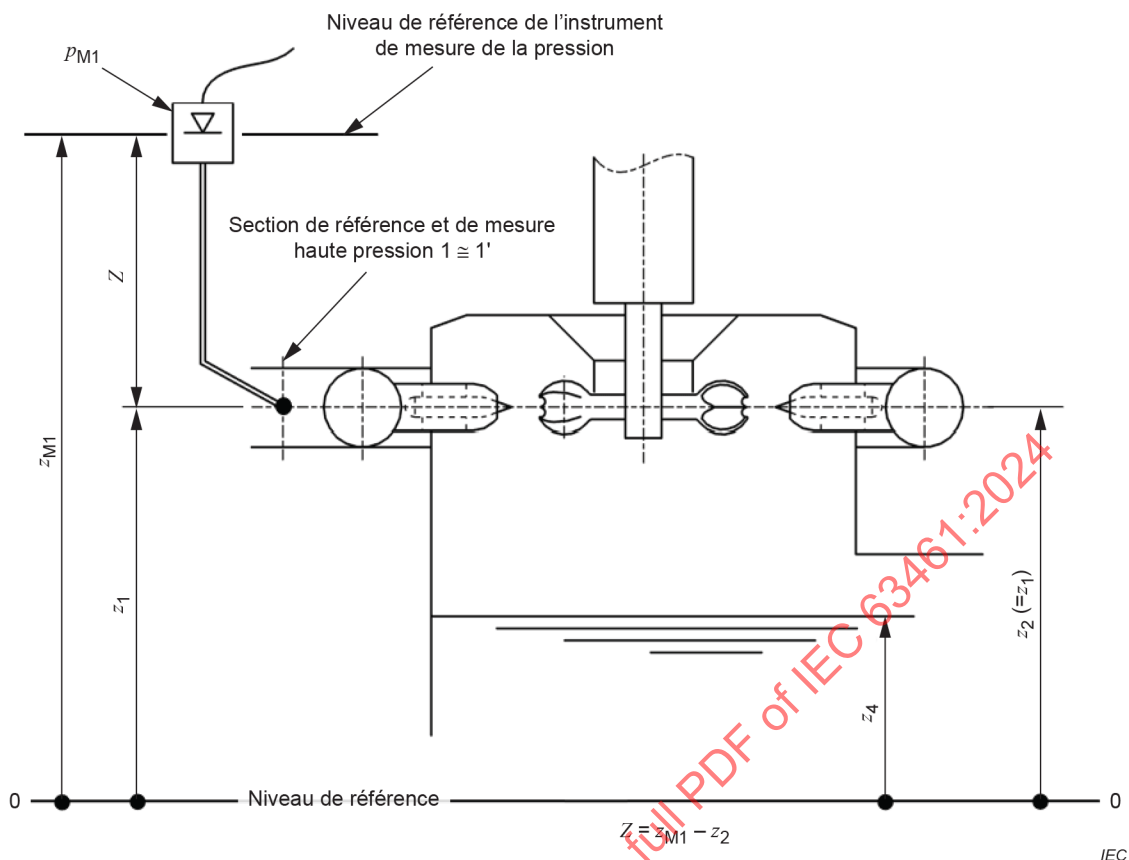


Figure 1 – Représentation schématique d'une machine Pelton

3.4.3 Configurations

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.3.1	Aire	Surface nette d'une section transversale perpendiculaire à la direction générale de l'écoulement	A	m ²
3.4.3.2	Course des pointeaux	Course moyenne des pointeaux mesurée à partir de la position fermée	s	m
3.4.3.3	Diamètre de référence	Diamètre moyen des cercles tangents à l'axe des jets centrés sur l'axe de la roue dans le plan médian de la roue (voir la Figure 2)	D	m
3.4.3.4	Largeur de l'auget	Largeur maximale intérieure de l'auget de la roue d'une turbine Pelton (voir la Figure 2 et la Figure 12)	B	m
3.4.3.5	Rapport d'échelle des longueurs	Rapport entre les longueurs représentatives du prototype et celles du modèle; en principe, il s'agit du diamètre de référence de la machine Note 1 à l'article: Dans les cas où il est difficile de vérifier cette référence, une autre longueur significative peut être prise.	λ_L	-
3.4.3.6	Niveau	Cote d'un point du système par rapport au niveau de référence spécifié (habituellement le niveau moyen de la mer)	z	m
3.4.3.7	Longueur	Dimension linéaire pertinente d'un composant de la machine	L	m
3.4.3.8	Rugosité arithmétique	Écart moyen arithmétique du profil d'évaluation	Ra	μm
3.4.3.9	Nombre d'injecteurs	Nombre d'injecteurs de la turbine Pelton	z_0	
3.4.3.10	Nombre de jets pendant le fonctionnement	Nombre de jets de la turbine Pelton pendant le fonctionnement	z_j	

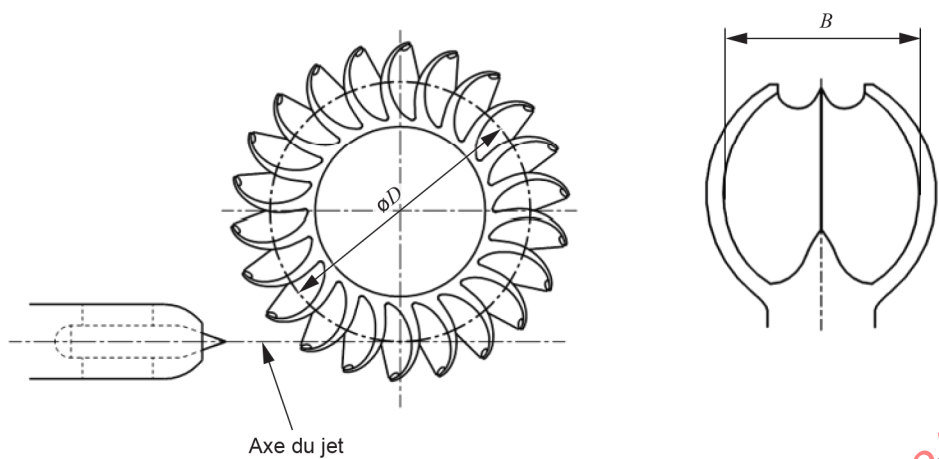


Figure 2 – Diamètre de référence et largeur de l'auget

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024 IEC

3.4.4 Grandeurs et propriétés physiques

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.4.1	Accélération due à la pesanteur	Valeur locale de l'accélération due à la pesanteur à l'emplacement d'essai (voir le 4.2); les valeurs théoriques en fonction de l'altitude et de la latitude sont indiquées dans le Tableau B.1.	g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
3.4.4.2	Température	Température thermodynamique (kelvin) Température en degré Celsius $\theta = \Theta - 273,15$	Θ θ	K °C
3.4.4.3	Volume	Quantité d'espace tridimensionnel occupée par un objet/une substance	V	m^3
3.4.4.4	Masse volumique	Masse par unité de volume a) Masse volumique de l'eau ρ est communément utilisé au lieu de ρ_{wa} b) Masse volumique de l'eau distillée Les valeurs pour l'eau distillée ρ_{wd} sont données en 4.3.1.3 et dans le Tableau B.2. c) Masse volumique de l'air Les valeurs pour l'air sont données en 4.4.1 et dans le Tableau B.5. d) Masse volumique du mercure Les valeurs pour le mercure sont données en 4.5 et dans le Tableau B.7.	ρ, ρ_{wa} ρ_{wd} ρ_{a} ρ_{Hg}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
3.4.4.5	Pression de vapeur (absolue)	Pression partielle absolue de la vapeur saturée dans un milieu dans lequel les phases liquide et gazeuse d'un corps sont en équilibre thermodynamique Note 1 à l'article: La pression de vapeur ne dépend que de la température. Les valeurs pour l'eau distillée sont données en 4.3.3 et dans le Tableau B.4.	p_{va}	Pa
3.4.4.6	Viscosité dynamique	Grandeur qui caractérise le comportement mécanique d'un fluide (voir l'ISO 80000-4)	μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
3.4.4.7	Viscosité cinématique	Rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique d'un fluide Note 1 à l'article: Les valeurs pour l'eau distillée en fonction de la température sont données en 4.3.2 et dans le Tableau B.3.	ν	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
3.4.4.8	Tension superficielle	Grandeur qui caractérise le comportement mécanique de l'interface entre deux fluides (voir l'ISO 80000-4)	σ^*	$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$

3.4.5 Débit, vitesse d'écoulement et vitesse de rotation

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.5.1	Débit	Volume d'eau qui s'écoule par unité de temps à travers une section du système	Q	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.2	Débit massique	Masse d'eau qui s'écoule par unité de temps à travers une section du système Note 1 à l'article: ρ et Q doivent tous deux être déterminés dans la même section et dans les conditions qui y règnent Note 2 à l'article: Le débit massique est invariable entre deux sections s'il n'existe entre celles-ci ni apport ni prélèvement d'eau.	(ρQ)	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.3	Débit mesuré	Volume d'eau qui s'écoule par unité de temps à travers une section de mesure, par exemple 1' ou 2' (voir les 3.4.2.3 et 3.4.2.4)	Q_1 , ou Q_2	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.4	Débit dans une section de référence	Volume d'eau qui s'écoule par unité de temps à travers la section de référence, par exemple 1 ou 2	Q_1 ou Q_2	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.5	Débit corrigé dans une section de référence	Volume d'eau transposé à la condition ambiante (voir le 3.4.6.2) qui s'écoule par unité de temps à travers la section de référence, par exemple $Q_{1c} = (\rho Q)_1 / \rho_{\text{amb}}$ Note 1 à l'article: Dans les conditions normales d'un essai sur modèle, Q_{1c} peut être par hypothèse égal à Q_1 .	Q_{1c} ou Q_{2c}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.6	Débit à la vitesse d'emballlement stabilisé	Débit à n_R (voir le 3.4.5.12)	Q_R	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.7	Débit à vide	Débit de la turbine à puissance mécanique nulle à la vitesse de rotation (généralement synchrone) et sous l'énergie hydraulique massique spécifiées	Q_o	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.8	Vitesse débitante	Débit Q divisé par l'aire A de la section transversale	v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.9	Vitesse périphérique	Vitesse au diamètre de référence $u = \pi D n$	u	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
3.4.5.10	Vitesse de rotation	Nombre de tours de la machine par unité de temps	n	s^{-1}
3.4.5.11	Vitesse d'emballlement stabilisé	Vitesse de rotation en régime permanent à puissance mécanique nulle dans des conditions hydrauliques et d'ouverture du pointeau spécifiées	n_R	s^{-1}
3.4.5.12	Vitesse maximale d'emballlement stabilisé	Valeur la plus élevée de la vitesse d'emballlement stabilisé dans des conditions hydrauliques spécifiées (pour le prototype, voir la définition détaillée dans l'IEC 60041:1991, 2.3.4.15).	$n_{R\text{max}}$	s^{-1}

3.4.6 Pression

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.6.1	Pression absolue	Pression statique d'un fluide mesurée par rapport au vide absolu	p_{abs}	Pa
3.4.6.2	Pression ambiante	Pression absolue de l'air ambiant (voir le 4.4.2) Note 1 à l'article: Les valeurs pour l'atmosphère type sont données en fonction de l'élévation dans le Tableau B.6 .	p_{amb}	Pa
3.4.6.3	Pression manométrique	Différence entre la pression statique absolue d'un fluide au niveau de référence de l'instrument de mesure de la pression et la pression ambiante au lieu et à l'instant du mesurage: $p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	p	Pa
3.4.6.4	Pression différentielle	Différence de pression entre deux points ou sections de mesure	Δp	Pa

3.4.7 Énergie massique

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.7.1	Énergie hydraulique massique de la machine	Énergie par unité de masse de l'eau disponible entre les sections de référence haute et basse pressions 1 et 2 de la machine, en tenant compte de l'influence de la compressibilité (voir le 8.2) $E = \frac{p_{\text{abs1}} - p_{\text{abs2}}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$ avec $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ et en partant du principe que $g = g_1 = g_2$ Note 1 à l'article: Les valeurs de ρ_1 et ρ_2 peuvent être calculées à partir de p_{abs1} et p_{abs2} respectivement, en tenant compte de θ_1 ou θ_2 pour les deux valeurs, étant donné l'influence négligeable de la différence de température sur ρ .	E	J·kg ⁻¹

3.4.8 Hauteur géométrique et hauteur de charge

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.8.1	Hauteur de charge de la turbine	Énergie massique par unité locale de poids de l'eau à une quelconque section $H = \frac{E}{g}$	H	m
3.4.8.2	Niveau de référence de la machine	Élévation d'un point de la machine pris comme référence pour le calage de la machine (voir la Figure 3)	z_r	m
3.4.8.3	Niveau de référence de l'instrument de mesure de la pression	Élévation d'un appareil de mesure de la pression (voir la Figure 34)	z_M	m

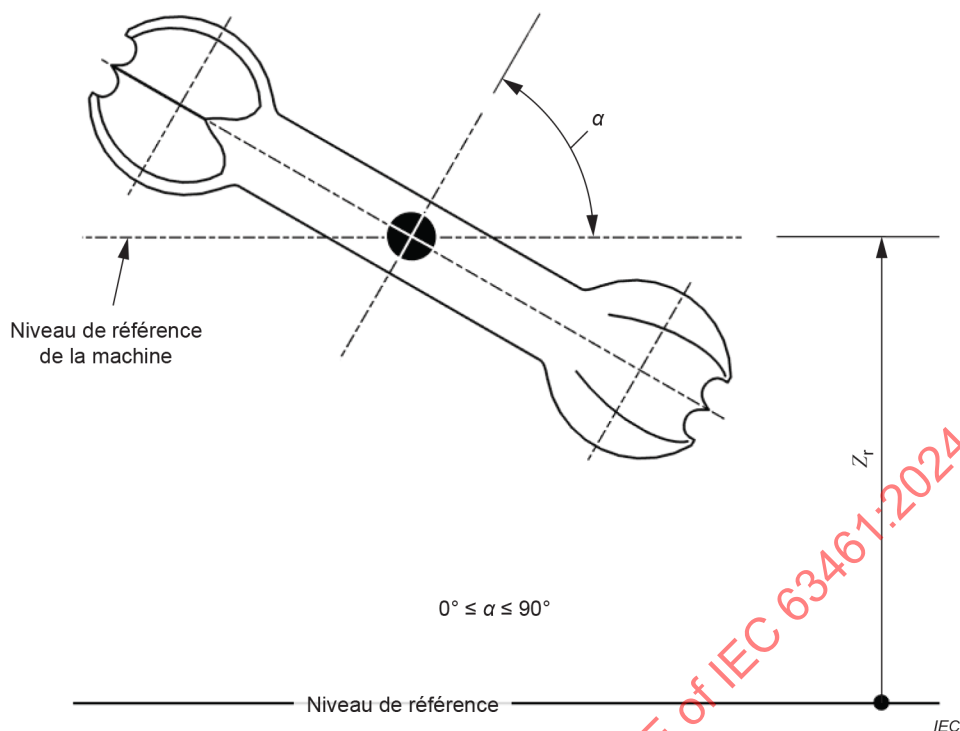
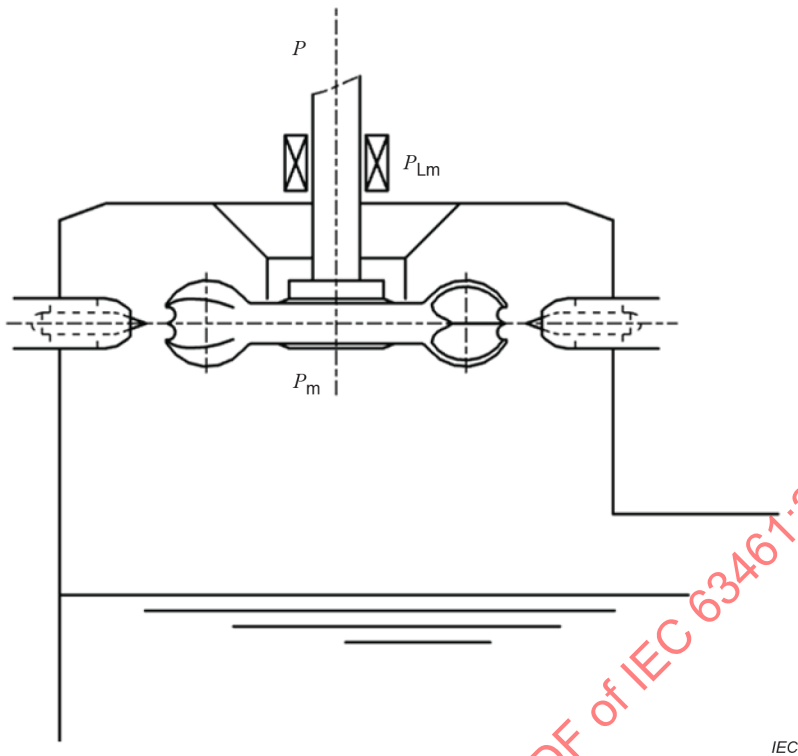


Figure 3 – Niveau de référence d'une machine Pelton

3.4.9 Puissance et couple

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.9.1	Puissance hydraulique	Puissance disponible dans l'eau pour produire de l'énergie (cas d'une turbine) ou puissance transmise à l'eau (cas d'une pompe) $P_h = E(pQ)_1$	P_h	W
3.4.9.2	Puissance mécanique de la machine (puissance)	Puissance mécanique fournie par une turbine ou absorbée par une pompe au niveau de leur arbre, en imputant à la machine hydraulique les pertes mécaniques dans les paliers qui relèvent de celle-ci et dans les joints d'arbre (voir la Figure 4)	P	W
3.4.9.3	Puissance mécanique à la roue (ou aux roues)	Puissance mécanique transmise au niveau de l'accouplement de la roue (ou des roues) avec l'arbre (voir la Figure 4)	P_m	W
3.4.9.4	Pertes de puissance mécanique	Puissance mécanique dissipée dans les paliers-guides, les paliers de butée et dans les joints d'arbre de la machine hydraulique (voir la Figure 4)	P_{Lm}	W
3.4.9.5	Couple de l'arbre	Couple appliqué à l'arbre de la machine hydraulique et correspondant à la puissance mécanique de la machine (voir le 3.4.9.2)	T	N·m
3.4.9.6	Couple de la roue	Couple transmis au niveau de l'accouplement de la roue avec l'arbre et correspondant à la puissance mécanique de la roue (voir le 3.4.9.3)	T_m	N·m
3.4.9.7	Couple de frottement	Couple de frottement dans les paliers-guides, les paliers de butée et dans les joints d'arbre de la machine hydraulique (voir le 3.4.9.4)	T_{Lm}	N·m



Puissance hydraulique

$$P_h = E \rho Q$$

Puissance mécanique de la machine

$$P = P_m - P_{Lm}$$

Rendement mécanique

$$\eta_m = \frac{P}{P_m}$$

Rendement hydraulique

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$$

Rendement

$$\eta = \frac{P}{P_h}$$

NOTES

- Les formules ne tiennent pas compte de la compressibilité de l'eau.
- Pour une analyse détaillée des pertes internes, voir l'Annexe I.

Figure 4 – Bilan schématique des puissances

3.4.10 Rendement

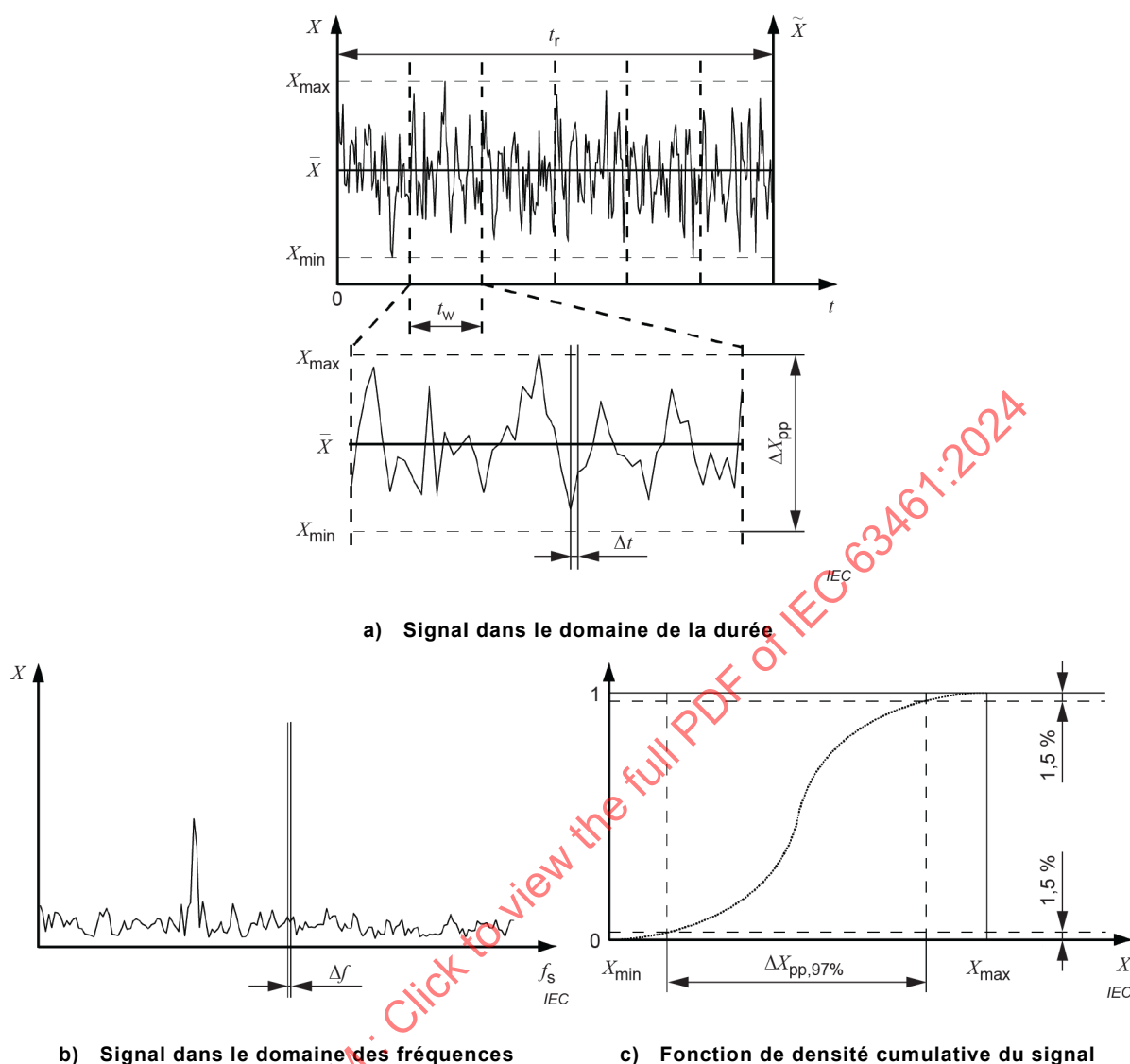
Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.10.1	Rendement hydraulique	Rapport entre la puissance mécanique de la roue et la puissance hydraulique $\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$ Voir la Figure 4	η_h	-
3.4.10.2	Rendement mécanique	Rapport entre la puissance mécanique de la machine et la roue. $\eta_m = \frac{P}{P_m}$ Voir la Figure 4	η_m	-
3.4.10.3	Rendement	Rapport entre la puissance mécanique de la machine et la puissance hydraulique. $\eta = \frac{P}{P_h} = \eta_h \times \eta_m$ Voir la Figure 4	η	-
3.4.10.4	Rendement moyen pondéré	Valeur calculée selon la formule $\eta_w = \frac{w_1\eta_1 + w_2\eta_2 + w_3\eta_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots}$ où $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ sont les valeurs du rendement dans des conditions de fonctionnement spécifiées et $w_1, w_2, w_3, \dots$ sont les coefficients de pondération respectifs convenus.	η_w	-

3.4.11 Grandeurs fluctuantes

NOTE L'IEC 60994 fournit une référence pour les termes relatifs aux grandeurs fluctuantes. Les termes pertinents pour le présent document, dont certains sont représentés à la Figure 5, sont énumérés ci-dessous.

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	IEC 60994:1991
3.4.11.1	Quantité discrète	Quantité représentée par une séquence de ses valeurs momentanées	X	
3.4.11.2	Quantité discrète n	Valeur de la quantité n	X_n	
3.4.11.3	Nombre d'échantillons	Nombre total de quantités discrètes	N	
3.4.11.4	Nombre d'échantillons dans une fenêtre de temps	Nombre total de quantités discrètes utilisées pendant la durée de la fenêtre de temps	N_w	
3.4.11.5	Valeur moyenne	Somme algébrique des quantités discrètes divisée par le nombre d'échantillons $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n$	$\bar{X}$	2.3.3.1
3.4.11.6	Fluctuation de la grandeur	Variation oscillatoire d'une grandeur X par rapport à sa valeur moyenne pendant un intervalle de temps Δt préalablement sélectionné	$\tilde{X}(t)$	2.3.1.5
3.4.11.7	Valeur maximale	Valeur maximale dans un intervalle de temps choisi	$X_{\max}$	
3.4.11.8	Valeur minimale	Valeur minimale dans un intervalle de temps choisi	$X_{\min}$	

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	IEC 60994:1991
3.4.11.9	Écart-type Valeur efficace rapportée à la moyenne	Valeur quadratique moyenne de l'écart d'un ensemble de nombres par rapport à la valeur moyenne $\tilde{X}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}$	$\tilde{X}_{\text{eff}}$	2.3.3.2
3.4.11.10	Valeur quadratique moyenne	Racine carrée de la valeur moyenne au carré $X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^2}$	X_{rms}	2.3.3.3
3.4.11.11	Valeur crête à crête	Différence entre les valeurs maximale et minimale $\Delta X_{\text{pp}} = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$	ΔX_{pp}	2.3.2.11
3.4.11.12	Valeur crête à crête avec un intervalle de confiance de 97 %	Différence entre les valeurs maximale et minimale d'un signal est déterminée à l'aide d'une fonction de distribution de probabilités pour une valeur de probabilité donnée (par exemple, 97 %) Note 1 à l'article: Cette fonction est estimée en appliquant un comptage statistique. Les valeurs du signal non comprises dans l'intervalle de confiance correspondant sont exclues.	$\Delta X_{\text{pp}, 97\%}$	
3.4.11.13	Amplitude	Valeur maximale d'une grandeur sinusoïdale $X(t)$ $A = \frac{1}{2} \Delta X_{\text{pp}}$	A	2.3.2.10
3.4.11.14	Temps	Grandeur physique	t	2.3.2.3
3.4.11.15	Intervalle de temps d'échantillonnage	Intervalle de temps entre deux échantillons consécutifs	Δt	
3.4.11.16	Fréquence	Inverse de la période s^{-1} (Hz)	f	2.3.2.4
3.4.11.17	Fréquence d'échantillonnage Taux d'échantillonnage	Inverse de l'intervalle de temps d'échantillonnage $f_s = \frac{1}{\Delta t}$	f_s	
3.4.11.18	Durée de la fenêtre de temps	Fenêtre de temps sélectionnée pour les analyses de fréquence par les méthodes de transformée de Fourier $t_w = N_w \Delta t$	t_w	
3.4.11.19	Résolution en fréquence	Intervalle de fréquence entre deux valeurs consécutives dans la transformée de Fourier discrète $\Delta f = 1/t_w = f_s/N$	Δf	
3.4.11.20	Durée d'enregistrement du signal Temps d'acquisition	Période pendant laquelle un signal en provenance d'un transducteur est enregistré (en secondes).	t_r	2.3.4.14



- a) Un signal qui fluctue sur une durée d'enregistrement du signal définie (t_r). Au moins 5 fenêtres (t_w) doivent être incluses dans chaque durée d'enregistrement du signal (voir le 6.2.2.4).
- b) Le signal transformé dans le domaine des fréquences à l'aide de l'analyse de Fourier. La résolution en fréquence (Δf) exigée pour chaque analyse est déterminée par la vitesse de rotation de la machine (voir le 6.2.2.4).
- c) En utilisant la distribution de probabilité, chaque point de mesure de la Figure 5 a) est cumulé et les écarts extrêmes par rapport à la fluctuation moyenne sont supprimés. Un intervalle de confiance de 97 % est représenté dans cette figure.

Figure 5 – Représentation de quelques définitions relatives aux grandeurs oscillantes

3.4.12 Dynamique des fluides et mise à l'échelle ^{a)}

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.12.1	Nombre de Reynolds	Rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses (voir le 8.4.1) dans les turbines Pelton $\frac{uB}{\nu}$	Re	-
3.4.12.2	Nombre de Froude ^{b)}	Racine carrée du rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité (voir le 8.4.1) dans les turbines Pelton $\left[\frac{E}{gB}\right]^{1/2}$	Fr	-
3.4.12.3	Nombre de Weber ^{b)}	Rapport entre les forces d'inertie et les forces de tension superficielle $We = \left[\frac{\rho B v^2}{\sigma^*}\right]^{1/2}$ (voir le 8.4.1)	We	-
3.4.12.4	Différence de rendement hydraulique	Différence entre les valeurs de rendement hydraulique à deux points de fonctionnement similaires du point de vue hydraulique mesurées dans des conditions d'essai différentes (voir le 8.4.2)	$\Delta\eta_h$	-
^{a)} Voir l'ISO 80000-11. ^{b)} D'autres définitions de ces nombres peuvent être obtenues dans des ouvrages scientifiques pertinents.				

3.4.13 Termes et définitions adimensionnels

NOTE 1 Les performances de la machine peuvent être caractérisées par des termes adimensionnels fondés sur $E = 1$, $D = 1$ et $\rho = 1$ ou sur $n = 1$, $D = 1$ et $\rho = 1$.

NOTE 2 Les unités sont les suivantes: H (m); D (m); E ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); n (s^{-1}); ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); T ($\text{N} \cdot \text{m}$); P (W); Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

NOTE 3 Les relations entre ces termes adimensionnels et d'autres définitions existantes sont indiquées à l'Annexe A.

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Relations
3.4.13.1	Facteur de vitesse	$\frac{nD}{E^{0,5}}$	n_{ED}	
3.4.13.2	Facteur de débit	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0,5}}$	Q_{EB}	
3.4.13.3	Facteur de débit par injecteur	$\frac{Q_1}{B^2 E^{0,5} z_j}$	$Q_{EB,zj}$	$= \frac{Q_{EB}}{z_j}$
3.4.13.4	Facteur de couple	$\frac{T_m}{\rho_1 D^3 E}$	T_{ED}	$= \frac{T_{nD}}{E_{nD}} = \frac{P_{ED}}{2\pi n_{ED}}$
3.4.13.5	Facteur de puissance ^{a)}	$\frac{P_m}{\rho_1 D^2 E^{1,5}}$	P_{ED}	$= Q_{EB} \eta_{hT}$ $= 2\pi n_{ED} T_{ED}$
3.4.13.6	Débit massique	$\frac{Q_1}{\pi (B/2)^2 (2E)^{0,5} z_j}$	f_B	
3.4.13.7	Coefficient d'énergie	$\frac{E}{n^2 D^2}$	E_{nD}	
^{a)} Il est fait référence à la puissance mécanique de la roue, généralement mesurée sur le modèle.				

3.4.14 Données de performance supplémentaires

NOTE Pour la présentation et l'analyse des données de performance supplémentaires (par exemple, les fluctuations de pression et de couple, la poussée hydraulique et les charges hydrauliques sur les organes de commande), les termes adimensionnels sont utilisés tels que définis ci-après et en 10.1 à 10.2. Ils sont identifiés par le symbole de la grandeur mesurée, les indices désignant le composant de la machine et les grandeurs qui sont prises à l'unité; par exemple, $T_{D,EB}$ désigne le facteur de couple du déflecteur, c'est-à-dire le couple agissant sur le déflecteur en fonction de l'énergie hydraulique massique de la machine et de la largeur de l'auget égale à l'unité.

Les symboles utilisés pour définir les mesurages sont énumérés ci-dessous:

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.14.1	Force	Influence qui tend à produire un mouvement ou une contrainte sur un composant de la machine	F	N
3.4.14.2	Moment	Ampleur de l'effet de rotation produit par une force qui agit à une distance perpendiculaire à un point donné	M	N·m
3.4.14.3	Pression	Force par unité de surface	p	Pa
3.4.14.4	Couple	Composante axiale du moment	T	N·m

Les termes adimensionnels relatifs à des données de performance supplémentaires sont énumérés ci-dessous:

Paragraphe	Terme	Définition	Symbole	Unité
3.4.14.5	Facteur de couple du déflecteur	$T_{D,EB} = \frac{T_D}{\rho D B^2 E}$	$T_{D,EB}$	-
3.4.14.6	Coefficient de couple du déflecteur	$T_{D,nB} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^3 B^2}$	$T_{D,nB}$	-
3.4.14.7	Facteur de force du pointeau	$F_{N,EB} = \frac{F_N}{\rho B^2 E}$	$F_{N,EB}$	-
3.4.14.8	Coefficient de force du pointeau	$F_{N,nB} = \frac{F_N}{\rho n^2 D^2 B^2}$	$F_{N,nB}$	-

4 Propriétés physiques

4.1 Généralités

Le présent paragraphe définit les principales propriétés physiques nécessaires pour caractériser le comportement hydraulique des machines hydrauliques. Les termes et définitions de la plupart de ces grandeurs sont énumérés en 3.4.4 avec leurs symboles et leurs unités.

Les formules qui peuvent être utilisées dans le traitement des données pour calculer ces grandeurs sont énumérées en 4.2, 4.3 et 4.4. Pour plus de commodité, les tableaux des valeurs numériques tirées de ces formules figurent à l'Annexe B.

4.2 Accélération due à la pesanteur

L'accélération due à la pesanteur g (voir le 3.4.4.1) est donnée en fonction de la latitude et de l'altitude:

$$g = 9,780 \, 3 \left(1 + 0,005 \, 3 \sin^2 \varphi \right) - 3 \times 10^{-6} z \, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

où

φ est la latitude en radians;

z est l'altitude en mètres.

Les valeurs de g sont données dans le Tableau B.1 et sont représentées à la Figure 6.

La valeur étalon internationale de l'accélération due à la pesanteur g_n est de $9,806\,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Les valeurs mesurées de g doivent être utilisées lorsqu'elles sont disponibles. La valeur locale de g peut être mesurée par exemple au moyen d'un pendule ou d'une chute libre (dans le vide).

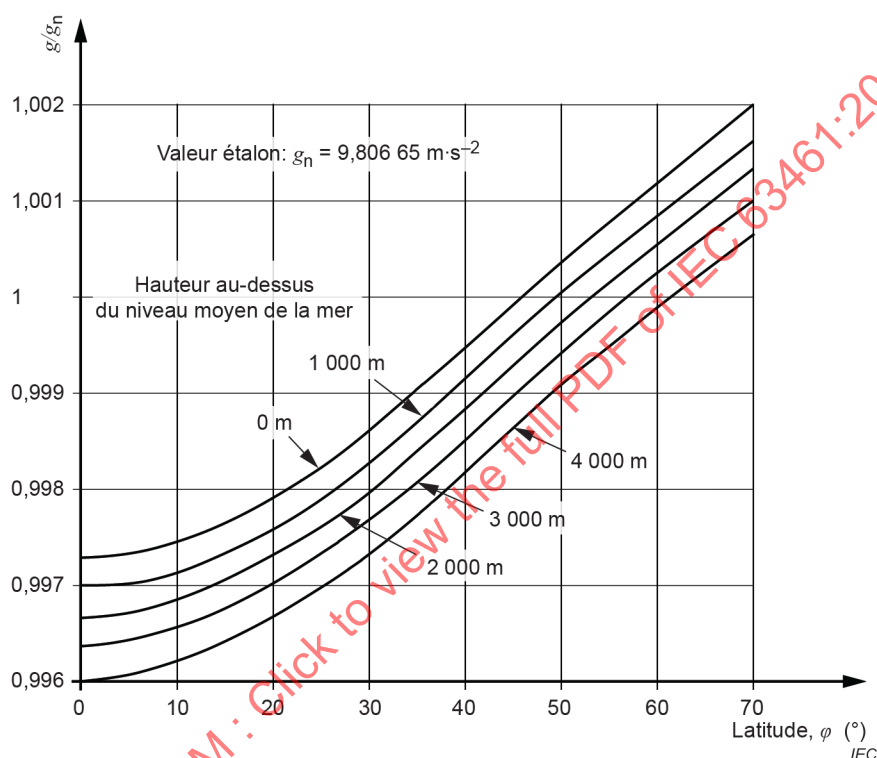


Figure 6 – Accélération due à la pesanteur g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

4.3 Propriétés physiques de l'eau

4.3.1 Masse volumique de l'eau

4.3.1.1 Application de la masse volumique de l'eau

Lors des essais de machines hydrauliques, la masse volumique de l'eau ρ (voir le 3.4.4.3) doit être connue afin de:

- déterminer l'énergie hydraulique massique de la machine E à partir des mesurages de la pression (voir le 3.4.7.1);
- déterminer le débit massique (ρQ) nécessaire au calcul de la puissance hydraulique (voir le 3.4.9.1);

et, au besoin, de:

- calculer la pression à partir des mesurages effectués à l'aide d'un manomètre à colonne d'eau (voir le 7.2.4.2.1);
- déterminer le débit lorsque la méthode par pesée est utilisée pour le mesurage proprement dit ou pour l'étalonnage (voir les 7.1.4.1 et 7.1.4.2).

4.3.1.2 Masse volumique de l'eau réelle

L'eau utilisée pour les essais sur modèle en laboratoire contient de légères quantités de substances dissoutes, en fonction des conditions hydrologiques locales. Par conséquent, sa masse volumique réelle ρ_{wa} est plus élevée que celle de l'eau distillée ρ_{wd} (voir le 4.3.1.3). Toutefois, la valeur de ρ_{wa} dans le matériel d'essai sur modèle diffère généralement de moins de 0,05 % de la valeur de l'eau distillée ρ_{wd} .

Pour le calcul du rendement hydraulique, cet écart est négligeable si l'énergie hydraulique massique de la machine E est principalement déterminée par mesurage de la pression. Par conséquent, dans la plupart des cas, il est suffisant et approprié d'appliquer les valeurs relatives à l'eau distillée.

Toutefois, lorsqu'il est nécessaire de déterminer la masse volumique ρ_{wa} de l'eau réellement utilisée, plusieurs méthodes peuvent être appliquées:

- une méthode indirecte qui utilise un manomètre étalonné relié à un niveau d'eau libre statique, comme cela est décrit en 7.2.5.2;
- des méthodes directes telles qu'un hydromètre de précision (par exemple, un pycnomètre ou un "flacon densimètre") ou une méthode de la poussée hydrostatique.

Il peut être pris pour hypothèse que le rapport entre la masse volumique de l'eau réelle et celle de l'eau distillée est constant quelles que soient la pression et la température. Ainsi, lorsque la masse volumique de l'eau réelle a été mesurée dans certaines conditions c de pression et de température ($\rho_{wa,c}$), sa valeur pour toute autre condition peut être calculée par:

$$\rho_{wa} = \left(\frac{\rho_{wa,c}}{\rho_{wd,c}} \right) \rho_{wd}$$

où ρ_{wd} et $\rho_{wd,c}$ sont calculées conformément à 4.3.1.3.

4.3.1.3 Masse volumique de l'eau distillée

La formule de la masse volumique ρ_{wd} de l'eau distillée en fonction de la température et de la pression est dérivée par Herbst et Roegenar [1]³ à partir de l'équation d'état empirique de l'enthalpie libre de l'eau distillée. Pour déterminer les coefficients ci-dessous, tous les résultats d'essai de Kell et Whalley [2] et de Kell, McLaurin et Whalley [3] ont été utilisés.

$$\rho_{wd} = 10^2 \left[\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 R_{ij} \times \alpha^j \times \beta^{(i-1)} \right]^{-1}$$

où

$$\beta = \frac{1}{p^*} (p_{abs} + 200 \times 10^5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\theta^*} (\theta - \theta_1)$$

³ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

avec

$$p^* = 10^5 \text{ Pa};$$

$$\theta^* = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{de } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ à } 20 \text{ } ^\circ\text{C}: \theta_1 = 0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{de } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ à } 50 \text{ } ^\circ\text{C}: \theta_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La formule est valable dans la plage de pressions utilisée allant de $p_{\text{abs}} = 0 \text{ Pa}$ à $150 \times 10^5 \text{ Pa}$

Le Tableau 1 donne les coefficients R_{ij} ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$).

Tableau 1 – Coefficients de la formule de Herbst et Roegener

$R(i,j)$ dans la plage de températures comprise entre 0,0 °C et 20,0 °				
i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
0	$0,446\,674\,155\,7 \times 10^{-4}$	$-0,559\,450\,069\,7 \times 10^{-4}$	$0,340\,259\,195\,5 \times 10^{-5}$	$-0,413\,634\,518\,7 \times 10^{-7}$
1	$0,101\,069\,380\,2$	$-0,151\,370\,926\,3 \times 10^{-4}$	$0,106\,379\,874\,4 \times 10^{-5}$	$-0,814\,607\,899\,5 \times 10^{-8}$
2	$-0,539\,839\,211\,9 \times 10^{-5}$	$0,467\,275\,668\,5 \times 10^{-7}$	$-0,119\,476\,536\,1 \times 10^{-8}$	$0,136\,632\,205\,3 \times 10^{-10}$
3	$0,778\,011\,812\,1 \times 10^{-9}$	$-0,161\,939\,132\,2 \times 10^{-10}$	$0,588\,354\,748\,5 \times 10^{-12}$	$-0,875\,401\,428\,7 \times 10^{-14}$
$R(i,j)$ dans la plage de températures comprise entre 20,0 °C et 50,0 °C				
i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
0	$-0,441\,035\,565\,0 \times 10^{-4}$	$0,305\,225\,289\,8 \times 10^{-4}$	$0,920\,784\,842\,7 \times 10^{-6}$	$-0,259\,043\,119\,8 \times 10^{-7}$
1	$0,101\,126\,989\,2$	$0,176\,395\,623\,4 \times 10^{-4}$	$0,575\,034\,004\,4 \times 10^{-6}$	$-0,192\,376\,997\,8 \times 10^{-8}$
2	$-0,483\,244\,116\,3 \times 10^{-5}$	$0,153\,328\,170\,4 \times 10^{-7}$	$-0,374\,972\,129\,4 \times 10^{-9}$	$0,132\,280\,418\,0 \times 10^{-11}$
3	$0,619\,443\,332\,7 \times 10^{-9}$	$-0,316\,454\,043\,1 \times 10^{-11}$	$0,631\,138\,912\,3 \times 10^{-13}$	$0,246\,924\,934\,2 \times 10^{-15}$

Au lieu des formules de Herbst et Roegener [1], les formules de Borel et Lan [4] ou de Haar, Gallagher et Kell [5] peuvent également être utilisées pour le calcul par ordinateur.

Tous ces auteurs se sont fondés sur les valeurs expérimentales de [2] et [3]. Les valeurs de ces références se situent dans la même plage d'exactitude ($\pm 0,01 \%$) et dans la plage de température et de pression mentionnée ci-dessus.

Pour une application numérique, l'équation empirique plus simple de Weber [6], quelque peu transformée, peut être utilisée. Les valeurs calculées pour des températures allant jusqu'à $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ et des pressions allant jusqu'à $1150 \times 10^5 \text{ Pa}$ se situent dans la même plage d'exactitude que celle mentionnée ci-dessus:

Si V est le volume massique en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$:

$$V = \frac{1}{\rho} = V_0 \left[(1 - Ap) + 8 \times 10^{-6} (\theta - B + Cp)^2 - 6 \times 10^{-8} (\theta - B + Cp)^3 \right]$$

avec

$$V_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$p = p_{\text{abs}} \text{ (Pa)}$$

$$\theta = \text{température (} ^\circ\text{C)}$$

$$A = 4,669\,9 \times 10^{-10}$$

$$B = 4,0$$

$$C = 2,131\,891\,3 \times 10^{-7}$$

Les valeurs pour l'eau distillée obtenues sur la base de la formule de Herbst et Roegener [1] sont données dans le Tableau B.2 et sont représentées à la Figure 7.

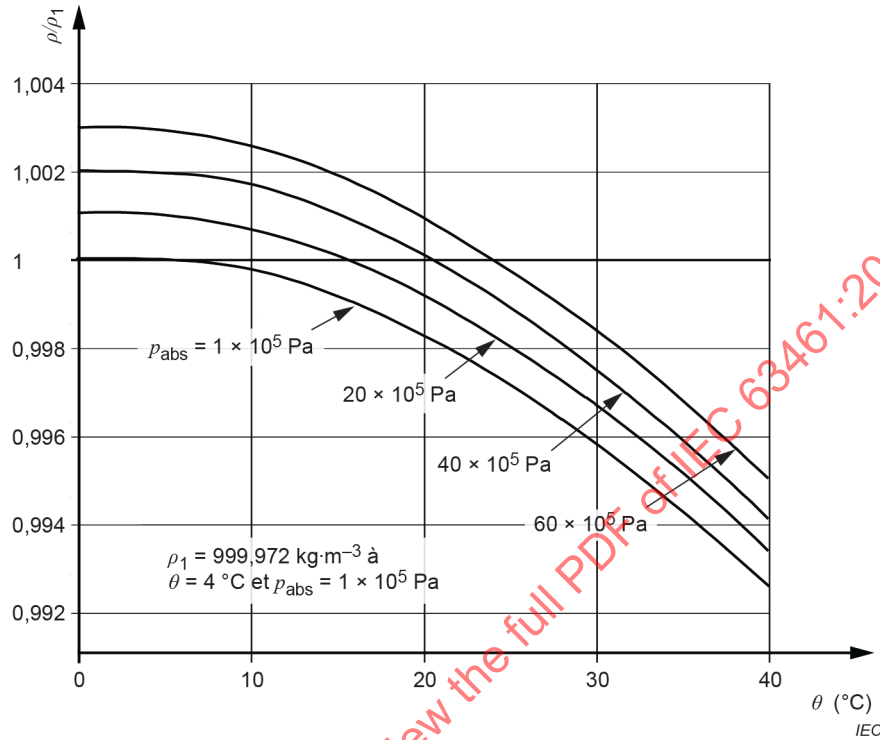


Figure 7 – Masse volumique de l'eau distillée ρ_{wd} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

4.3.2 Viscosité cinématique

La viscosité cinématique ν (voir le 3.4.4.6) de l'eau dépend de sa température θ et de sa pression absolue p_{abs} et est dérivée de la viscosité dynamique des propriétés physiques de base μ en utilisant la formule suivante $\nu = \mu / \rho$.

Une formule pour μ est donnée dans [10].

Cependant, pour des raisons pratiques dans les machines hydrauliques, une valeur approximative de ν peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\nu = e^{\left(-16,921 + \frac{396,13}{107,41 + \theta}\right)}$$

En utilisant cette équation, l'écart moyen par rapport aux valeurs normalisées données dans [11] est de $\pm 0,05 \%$, l'écart maximal est de $\pm 0,09 \%$.

L'influence de la pression est négligeable. L'écart pour $p = 10 \times 10^5 \text{ Pa}$ par rapport à une pression de référence de $p = 10^5 \text{ Pa}$ est d'environ $-0,05 \%$.

Les valeurs pour ν sont données dans le Tableau B.3.

4.3.3 Pression de vapeur

La pression de vapeur p_{va} (voir le 3.4.4.5) de l'eau entre les températures de l'eau $\theta = 0\text{ °C}$ et $\theta = 40\text{ °C}$ peut être calculée à l'aide de la formule empirique suivante:

$$p_{va} = 10^{(2,786\,2 + 0,031\,2\theta - 0,000\,104\theta^2)}$$

L'erreur résultante est inférieure à $\pm 7\text{ Pa}$. Les valeurs numériques de p_{va} sont données dans le Tableau B.4, voir [5].

Une attention particulière doit être accordée aux substances chimiques dissoutes dans l'eau qui peuvent influencer la pression de vapeur.

4.4 Conditions physiques de l'atmosphère

4.4.1 Masse volumique de l'air sec

La masse volumique de l'air ρ_a (voir le 3.4.4.4) en fonction de p_{abs} (voir le 3.4.6.1) et de la température de l'air θ peut être calculée à l'aide de la formule suivante, conformément à l'ISO 2533:

$$\rho_a = \frac{3,483\,7 \times 10^{-3} p_{abs}}{273,15 + \theta}$$

Les valeurs pour ρ_a sont données dans le Tableau B.5.

L'influence de l'humidité sur la masse volumique de l'air est négligeable pour la détermination de E .

4.4.2 Pression ambiante

Normalement, la pression ambiante p_{amb} (voir le 3.4.6.2) est la pression barométrique mesurée en laboratoire par un baromètre. Pour la conversion des résultats d'essai aux conditions du prototype sur le site, la pression ambiante doit être calculée à l'aide de l'atmosphère type définie dans l'ISO 2533.

En utilisant le niveau de la mer comme référence de base, la pression ambiante peut être calculée à l'aide de la formule approximative suivante, tirée de l'ISO 2533:

$$p_{amb} = 101\,325 \left(1 - 2,256 \times 10^{-5} z\right)^{5,256}$$

où

z est l'élévation (m).

L'erreur résultante est inférieure à $\pm 15\text{ Pa}$. Les valeurs pour p_{amb} à partir de l'ISO 2533 sont données dans le Tableau B.6.

4.5 Masse volumique du mercure

La masse volumique du mercure ρ_{Hg} (voir le 3.4.4.4) utilisée dans les manomètres à colonne liquide est calculée pour le mercure pur à l'aide de l'équation suivante:

$$\rho_{\text{Hg}} = (13,595 - 2,46\theta) \left[1 + 3,85 \times 10^{-11} (p - p_0) \right]$$

où

p_0 101 325 Pa (pression ambiante normale par rapport au niveau de la mer)

Les valeurs pour ρ_{Hg} sont données dans le Tableau B.7, voir [12].

Le mercure utilisé dans les applications pratiques peut être contaminé par des métaux dissous ou par d'autres matériaux. Pour garantir la validité des mesurages, le mercure doit être pur et propre.

5 Exigences d'essai

5.1 Exigences relatives à l'installation d'essai et au modèle d'essai

5.1.1 Choix du laboratoire

Il convient de considérer approprié tout laboratoire qui satisfait aux critères énoncés dans le présent document en ce qui concerne la disposition générale, la capacité et la qualité de l'instrumentation. Il est parfois préférable de recourir à un laboratoire indépendant surtout lorsqu'il est exigé de réaliser des essais comparatifs avec des modèles de différents fabricants.

5.1.2 Exigences relatives à l'installation d'essai

5.1.2.1 Caractéristiques générales du circuit d'essai

Les éventuelles bulles de gaz entraînées dans le modèle ne doivent pas affecter le fonctionnement de l'instrumentation, en particulier de l'appareil de mesure du débit et des lignes de mesure de la pression.

Le circuit doit être conçu de manière qu'aucune fuite ou addition d'eau ne puisse se produire entre l'instrument de mesure du débit et le modèle. Il convient que ces critères soient facilement vérifiables.

5.1.2.2 Capacité de l'installation d'essai

La capacité de l'installation d'essai (c'est-à-dire la puissance, la pression, l'énergie hydraulique massique et le débit) doit être telle que les valeurs minimales pour les dimensions du modèle et les conditions d'essai exigées énumérées en 8.5.2 puissent être satisfaites.

Le fonctionnement doit être stable et régulier, sans à-coups ni fluctuations (voir le 8.5.3).

5.1.2.3 État de l'eau

L'eau d'essai doit être propre, claire et exempte de toute matière solide en suspension et de toute impureté chimique qui peut influencer sur les propriétés de l'eau telles que la viscosité et la pression de vapeur. Il convient d'éliminer autant que possible avant l'essai les gaz libres et les bulles d'air.

Il convient que la température de l'eau se situe dans une plage comprise entre 8 °C et 35 °C et ne varie pas de plus de 5 °C par jour. Il convient d'éviter les écarts importants entre la température de l'eau et la température ambiante des instruments, car ils peuvent influencer sur l'exactitude des mesurages.

5.1.2.4 Conditions d'écoulement données par l'installation d'essai

À l'entrée du modèle d'essai, l'installation d'essai doit garantir des conditions hydrauliques favorables, exemptes de tourbillons, de turbulences excessives et d'instabilité.

À la sortie du modèle d'essai, il convient que la configuration d'écoulement ne soit pas influencée par la disposition de l'installation d'essai.

5.1.2.5 Instruments de mesure

L'appareil de mesure utilisé pour déterminer les principaux paramètres doit satisfaire aux conditions spécifiées dans le présent document.

La traçabilité de chaque instrument à une norme nationale ou internationale reconnue doit être assurée. Il convient d'étalonner *in situ* tous les instruments, en particulier ceux relatifs au débit et au couple. Certains étalonnages (par exemple, celui des instruments dynamiques) peuvent être effectués avant l'installation sur le banc d'essai.

Il convient que les instruments de mesure soient tels qu'une lecture parallèle, indépendante du système d'acquisition de données, soit possible afin de permettre une vérification aisée.

La vérification doit confirmer que la température de l'instrument se situe dans les limites de la spécification autorisée par le fabricant.

5.1.3 Exigences relatives au modèle d'essai

5.1.3.1 Taille du modèle

Les valeurs minimales requises pour la taille du modèle sont données en 8.5.2.

En principe, les modèles doivent être aussi grands que possible, mais jamais inférieurs aux valeurs indiquées. Il convient d'utiliser le même modèle pour tous les essais de performance hydraulique principale (voir le 9.2). Les essais comparatifs sur modèle doivent être effectués avec des modèles de même taille.

5.1.3.2 Disposition et conception mécanique du modèle

La disposition et la conception mécanique du modèle doivent être conformes aux points d'essai spécifiés. Les points suivants sont rigoureusement pris en considération:

- les déformations dues à la charge dans le cadre de l'énergie hydraulique massique choisie pour l'essai doivent être réduites le plus possible par une conception appropriée et un choix de matériaux approprié;
- les éléments mobiles utilisés pour modifier la configuration de la machine (injecteurs) doivent être capables de répéter et de maintenir une position déterminée;
- le palier, l'arbre et les parties fixes doivent avoir une rigidité suffisante pour éviter tout contact en fonctionnement normal;
- des passages d'eau à surface hydrauliquement lisse sont recommandés;
- outre les exigences générales relatives à l'état de surface, il convient d'accorder une grande attention à l'appariement correct des joints afin d'éviter toute séparation locale de l'écoulement;
- il convient de choisir les matériaux de manière à éviter l'oxydation et la corrosion électrochimique. Il convient que les surfaces des passages d'eau restent en bon état pendant toute la durée de l'essai;
- des dispositions doivent être prises pour faciliter le nettoyage ou la réparation des passages d'eau;

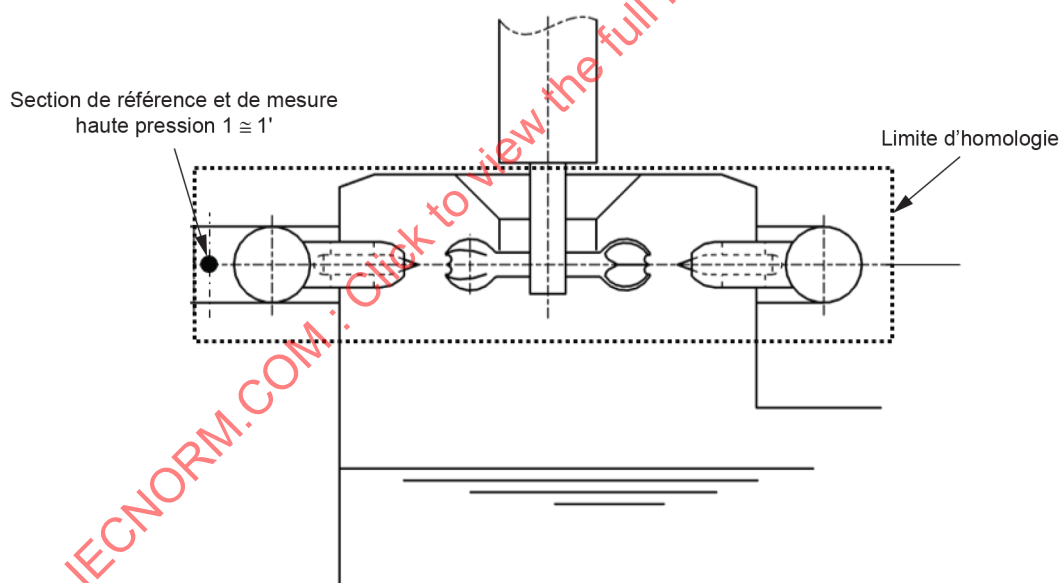
- il convient de prévoir un cône transparent ou des fenêtres pour observer l'écoulement dans le corps;
- lorsque des données supplémentaires doivent être mesurées (distribution de la vitesse d'écoulement), le modèle doit permettre d'installer et de vérifier facilement l'appareil de mesure correspondant;
- lorsqu'il faut procéder à une optimisation ou à une modification du composant individuel (par exemple, injecteurs, bossages de carter, etc.), le modèle doit permettre l'installation facile de plusieurs configurations;
- en cas de non-homogénéité, les procédures analytiques adoptées pour justifier ces différences doivent faire l'objet d'un accord mutuel.

5.1.3.3 Étendue du modèle

La position des sections de référence et l'étendue des passages d'eau de l'entrée à la sortie à inclure dans le modèle (au moins la partie entre les sections de référence haute pression et basse pression) doivent être clairement définies dans le contrat (voir la Figure 1 et, à titre d'exemple, la Figure 8 et la Figure 9).

La limite d'homologie sur la section basse pression doit être définie d'un commun accord.

L'attention doit être accordée à la distance entre la ligne médiane de la roue et le niveau aval, ainsi qu'à la configuration du canal de fuite, en particulier dans le cas des mesurages de l'influence du niveau aval (voir le 10.3).



IEC

Figure 8 – Exemple de limites d'homologie pour les parties mouillées d'une turbine Pelton verticale

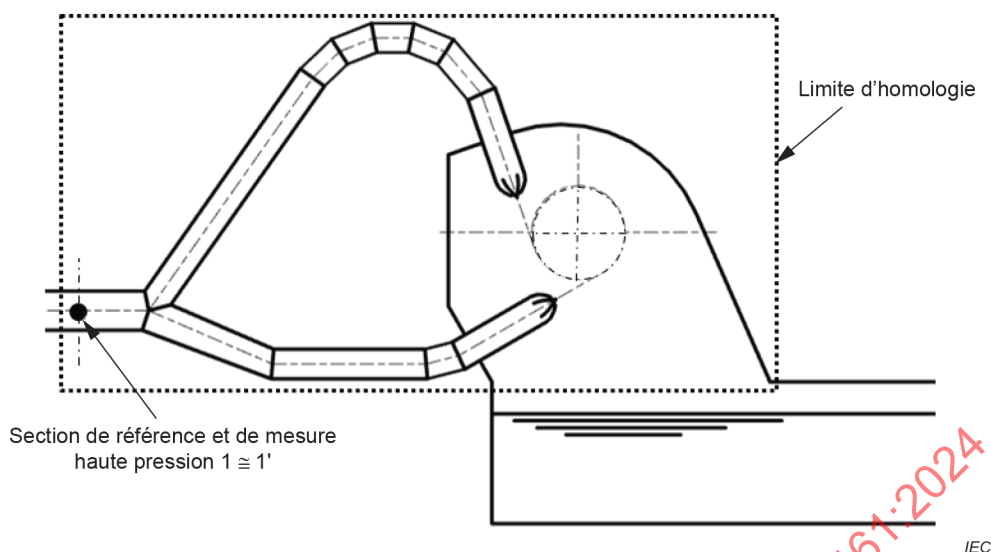


Figure 9 – Exemple de limites d'homologie pour les parties mouillées d'une turbine Pelton horizontale

Il convient d'inclure autant que possible dans le modèle tous les passages d'eau qui influencent les performances du prototype, c'est-à-dire les conditions d'entrée et de sortie.

Les fentes des vannes en amont ou en aval ne sont pas exigées, sauf si elles sont situées entre les sections de mesure ou de référence de la machine.

5.1.3.4 Similitude géométrique du modèle et du prototype

La similitude géométrique (homologie) entre le modèle et le prototype est une exigence fondamentale pour déterminer les performances d'un prototype à partir d'essais sur modèle. Il est donc nécessaire de comparer sur les deux machines les dimensions géométriques et le fini de surface de tous les composants en contact avec l'écoulement.

La similitude géométrique entre le modèle et le prototype doit être vérifiée conformément à 5.2.

Sauf spécification contraire, le modèle doit être géométriquement similaire (homologue) au prototype pour toutes les parties mouillées, dans les limites définies en 5.1.3.3. Cette similitude concerne également des éléments qui peuvent avoir une influence mesurable sur les performances. Toutefois, dans les cas particuliers où des écarts mineurs par rapport à la similitude ne peuvent être évités, un accord doit être conclu pour déterminer si les résultats doivent être corrigés.

Certaines configurations spécifiques peuvent avoir une influence mesurable sur le comportement de la turbine, comme les échangeurs thermiques dans le canal de fuite. Un accord doit être conclu pour déterminer si des mesurages ou des actions spécifiques doivent être effectués.

Il convient d'évaluer sur le prototype toute non-homologie ou tout écart qui peut survenir au cours de la fabrication ou de l'installation, et il faut convenir d'un commun accord des mesures correctives pour réduire l'influence de ceux-ci sur les performances hydrauliques.

Il convient de corriger tous les changements brusques. Il est recommandé d'utiliser au moins un rapport de 1:10 pour corriger la zone de transition.

Sur le prototype, outre les exigences générales relatives à l'état de surface, il convient d'accorder une grande attention à l'appariement correct des joints pour tous les composants en contact avec l'écoulement afin d'éviter toute perturbation locale de l'écoulement.

Le sens de rotation n'a pas d'incidence mesurable sur les performances et peut différer entre le modèle et le prototype.

Pour les essais de réception à la fois sur le modèle et le prototype, il convient d'utiliser les mêmes sections de mesure si cela est possible. Sinon, un accord doit être conclu pour déterminer si les résultats doivent être corrigés.

Pour les essais comparatifs sur modèle, il convient de tourner tous les modèles dans le même sens.

5.2 Contrôle dimensionnel du modèle et du prototype

5.2.1 Généralités

Comme cela est indiqué en 5.1.3.4, la similitude géométrique entre le modèle et le prototype doit être vérifiée.

Pour fournir des informations sur les éléments géométriques majeurs et pertinents qui influencent les performances hydrauliques, la procédure de contrôle et les tolérances admissibles sont décrites ci-dessous.

Ces tolérances doivent être considérées comme des valeurs maximales admissibles pour assurer la similitude géométrique et l'influence mesurable sur les performances. En tout état de cause, ces tolérances reflètent l'exactitude technique réalisable en fabrication.

En raison de l'amélioration des procédés de fabrication, il est assez courant d'avoir, d'un commun accord, des exigences d'homologie plus strictes que celles prévues en 5.2.9.

L'homologie géométrique (ouvertures, angles et ondulations) est plus cohérente lorsque le profil est entièrement usiné par commande numérique par ordinateur (CNC - computer numerical control), ce qui est une pratique courante dans le secteur de la fabrication des roues.

Cela s'applique même dans le cas où le modèle est fabriqué selon une machine existante et où le prototype est donc le point de départ du processus.

5.2.2 Explication des termes utilisés pour le modèle et le prototype

Termes généraux utilisés pour le modèle et le prototype:

a) valeur individuelle

Il s'agit de la valeur qui résulte:

- du mesurage de la dimension d'un même élément d'un même composant effectué à différents endroits (par exemple, le diamètre de référence d'une roue);
- ou
- du mesurage de la dimension d'un même élément de différents composants récurrents effectué au même endroit (par exemple, la largeur d'un auget).

b) valeur moyenne

Il s'agit de la valeur moyenne arithmétique calculée à partir de plusieurs valeurs individuelles.

c) valeur théorique

Il s'agit de la valeur de conception indiquée sur un dessin. Les longueurs correspondantes des composants du modèle et du prototype L_M et L_P sont liées par le rapport d'échelle des longueurs λ_L (voir le 3.4.3.5).

5.2.3 Objectif des contrôles dimensionnels

Le contrôle dimensionnel:

- a) vérifie les principales dimensions du modèle et du prototype;
- b) vérifie l'uniformité du modèle et du prototype dans leurs composants récurrents, c'est-à-dire compare l'écart relatif entre les valeurs individuelles et la valeur moyenne correspondante. Les écarts maximaux admissibles sont indiqués dans les colonnes "tolérance d'uniformité" du Tableau 2;
- c) vérifie la similitude géométrique entre le prototype et le modèle, c'est-à-dire compare l'écart relatif entre la valeur moyenne du prototype et la valeur moyenne correspondante du modèle mis à l'échelle par λ_L . Les écarts maximaux admissibles sont indiqués dans les colonnes "tolérance de similitude" du Tableau 2. Cela inclut la vérification de la position relative de tous les composants les uns par rapport aux autres (voir le 5.2.4);
- d) compare la forme géométrique ou le profil tridimensionnel mesuré avec la configuration théorique, par exemple l'auget unique avant l'assemblage.

5.2.4 Règles générales

Au stade du contrat, les méthodes utilisées pour le contrôle dimensionnel doivent faire l'objet d'un accord mutuel. Si cela n'a pas été fait, un accord doit être conclu au plus tard avant l'essai de réception sur modèle.

Dans la pratique, le modèle physique à échelle réduite est comparé aux valeurs de conception pour satisfaire aux exigences de similitude. Toutefois, la similitude réelle doit être respectée entre le modèle à échelle réduite et le prototype physique. Lors du contrôle dimensionnel du prototype, les données du modèle à échelle réduite doivent être utilisées comme référence.

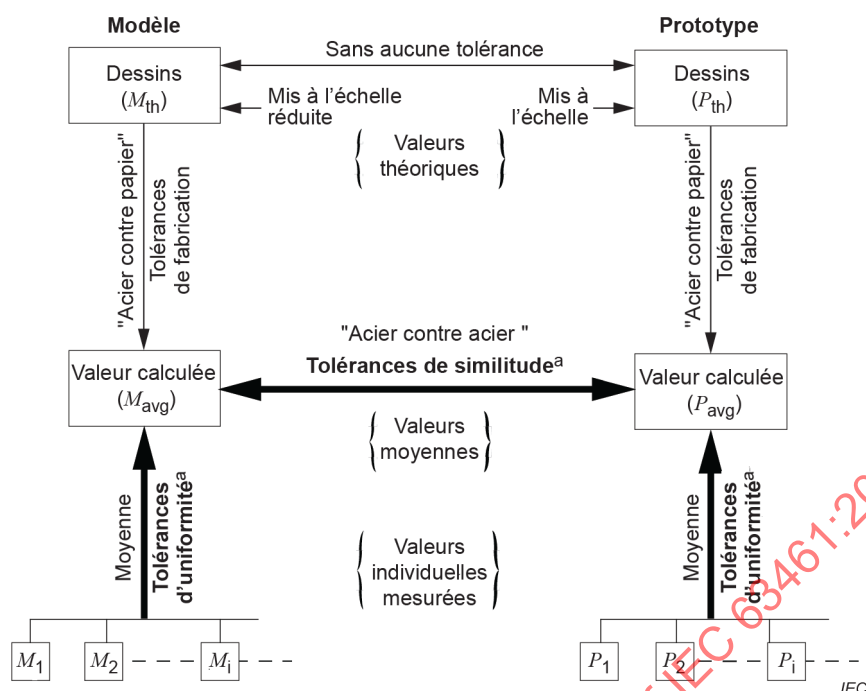
Puisque le prototype n'est généralement pas physiquement disponible au moment de l'essai sur modèle, une comparaison avec les valeurs de conception est suffisante.

Lorsque l'écart mesuré entre le modèle physique et la conception théorique dépasse la moitié de la tolérance maximale admise (voir le 5.2.9), le prototype doit être fabriqué de manière que l'écart total reste dans les limites de cette tolérance. En outre, la tolérance de fabrication du prototype doit être révisée en conséquence. L'ajout de tolérances à la conception théorique n'est pas admis. Par ailleurs, le fabricant est autorisé à réviser les dimensions de fabrication du prototype pour qu'elles soient conformes à la valeur moyenne mesurée lors de l'essai de réception sur modèle.

5.2.5 Procédure

5.2.5.1 Tolérances géométriques à prendre en considération

La Figure 10 schématise l'application des tolérances géométriques données par le présent document, sur les valeurs individuelles et moyennes du modèle et du prototype.



^a Les valeurs numériques des tolérances de similitude et des tolérances d'uniformité sont données en 5.2.9.

Figure 10 – Procédure de contrôle dimensionnel, de comparaison des résultats "acier contre acier" et d'application des tolérances pour le modèle et le prototype

5.2.5.2 Uniformité des composants du modèle et du prototype

En comparant le mesurage des valeurs individuelles avec celui de la valeur moyenne correspondante, il est possible de déterminer si les exigences d'uniformité des composants du modèle et du prototype ont été satisfaites.

Lorsque l'exigence d'uniformité n'est pas satisfaite, un accord doit être conclu sur les composants qu'il faut corriger ou fabriquer à nouveau.

Lorsque la différence entre la valeur moyenne et la valeur théorique est en dehors de la tolérance d'uniformité, un accord doit déterminer si la valeur théorique ou les dimensions géométriques du composant doivent être corrigées.

Lorsque des contrôles ponctuels sont effectués, c'est-à-dire lorsque tous les composants ou dimensions récurrents ne sont pas contrôlés, il peut être convenu de comparer directement les valeurs individuelles à la valeur théorique.

5.2.5.3 Similitude géométrique entre le prototype et le modèle

En comparant les valeurs moyennes correspondantes du modèle et du prototype et en prenant en considération les tolérances de similitude indiquées dans le présent document (voir le 5.2.9) ou conformément aux exigences contractuelles, il est possible de déterminer si l'exigence de similitude géométrique a été satisfaite. En cas d'accord, les valeurs théoriques correspondantes peuvent être substituées aux valeurs moyennes.

Lorsque les écarts sont supérieurs aux tolérances de similitude, d'autres mesures doivent être convenues, lesquelles peuvent inclure un nouvel essai avec le modèle corrigé.

Les dimensions théoriques du prototype doivent avoir des chiffres significatifs qui respectent la tolérance dimensionnelle.

Pour certaines dimensions (par exemple, les dimensions hors-tout) qui sont difficiles à mesurer sur le modèle ou le prototype, il peut être convenu qu'au lieu des valeurs moyennes du modèle ou du prototype, des valeurs théoriques peuvent être utilisées pour la comparaison, à condition que la somme des tolérances de fabrication et d'installation soit inférieure à la tolérance de similitude.

5.2.6 Méthodes

5.2.6.1 Généralités

Pour mesurer la forme et vérifier l'homologie de la roue, les profils individuels des augets modèles et prototypes, ainsi que des roues assemblées, doivent être mesurés à l'aide de machines de mesure des coordonnées (CMM - coordinate measuring machines), de systèmes de mesure optique, de gabarits, etc.

Il convient d'utiliser des gabarits ou des méthodes équivalentes pour vérifier le positionnement absolu des pales sur les roues assemblées.

Concernant les essais sur modèle réduit pour des modèles de roues, lorsqu'une machine CMM est utilisée et que le contrôle dimensionnel effectué selon 5.2.9 est conforme aux tolérances, il suffit de vérifier deux augets adjacents. Il convient ensuite de comparer graphiquement le profil mesuré à la conception théorique.

La configuration CAO (conception assistée par ordinateur) et les coordonnées des points de contrôle de la conception hydraulique sont la propriété intellectuelle du fabricant. Le fabricant n'est pas tenu de fournir la configuration CAO ou les coordonnées à l'acheteur.

Pour protéger la confidentialité et la propriété intellectuelle de la conception hydraulique, le fabricant ne doit signaler que les différences entre le profil mesuré et le profil théorique.

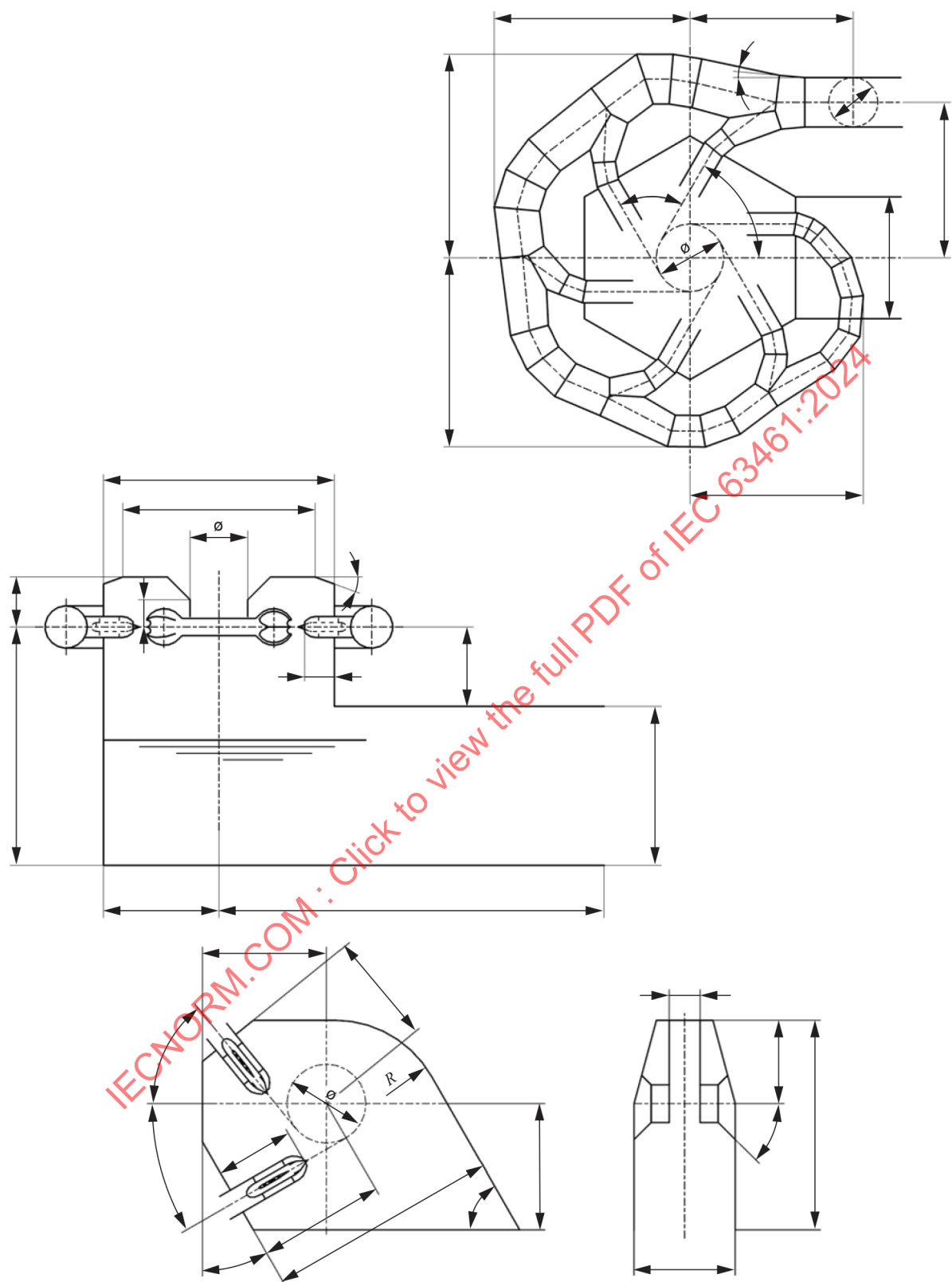
Lorsque des contrôles supplémentaires sont exigés sur le modèle ou le prototype, le nombre, les coordonnées des points de contrôle et leur format de stockage doivent être définis d'un commun accord.

En prenant en considération les méthodes de fabrication et de mesure de la roue, le fabricant doit proposer, en accord avec l'acheteur, la méthode et le lieu de contrôle les plus appropriés pour démontrer la similitude géométrique entre le prototype et le modèle.

La Figure 11 et la Figure 12 donnent des exemples qui représentent schématiquement l'emplacement et l'étendue du contrôle géométrique. Toutefois, la procédure de contrôle n'est pas limitée aux exemples donnés et ne signifie pas qu'il convient de vérifier toutes ces dimensions.

Lorsque le bord de sortie de l'auget Pelton est contenu dans un plan, il définit le plan de référence de l'auget (voir la Figure 12). Dans le cas contraire, la définition du plan de référence de l'auget doit faire l'objet d'un accord.

Lorsqu'une longueur ne peut être mesurée directement, par exemple si un point d'intersection est couvert par un filet, le mesurage doit être effectué selon une procédure convenue.



IEC

Figure 11 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à vérifier sur le distributeur et le corps des machines à arbre vertical et horizontal

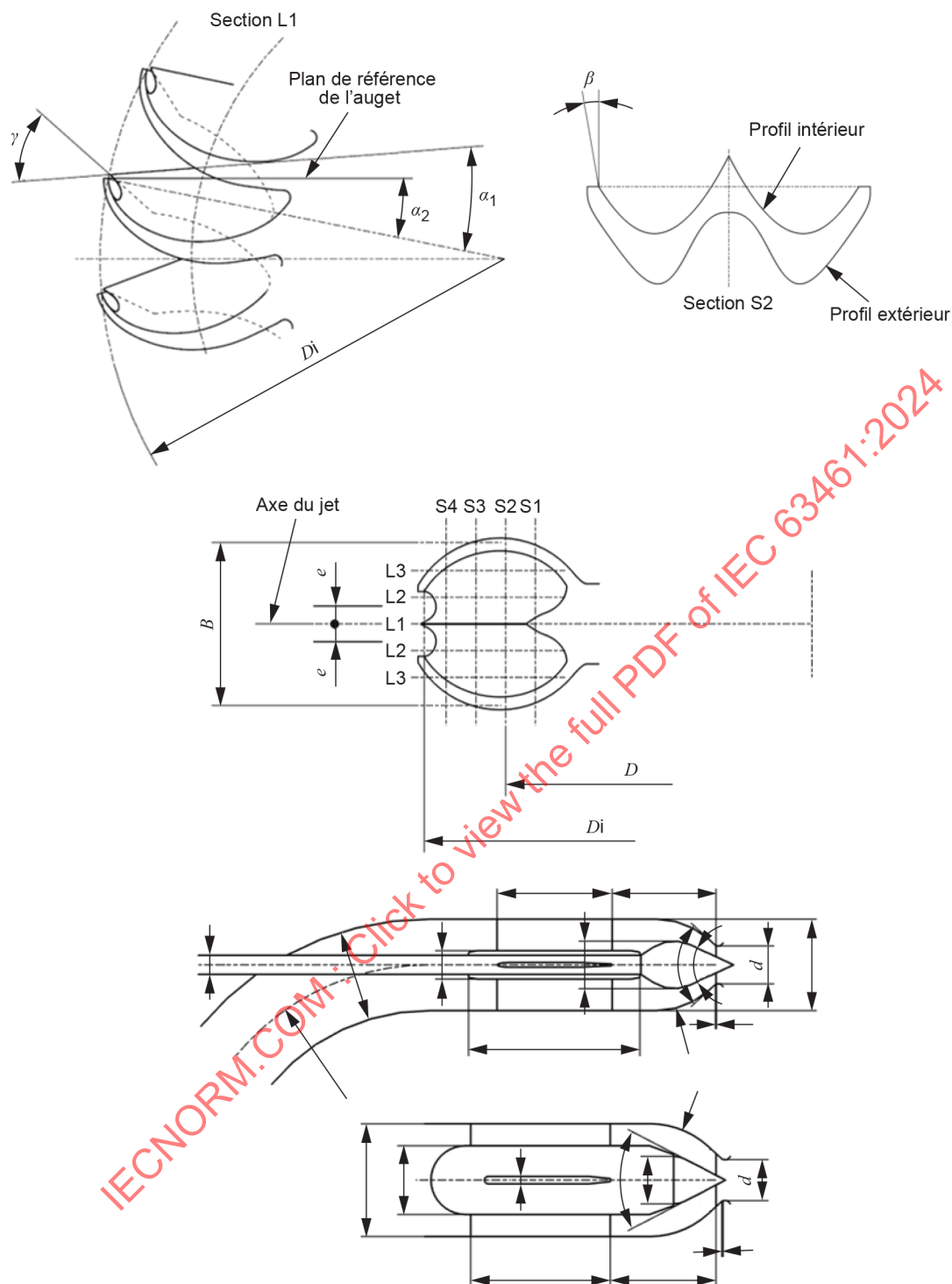


Figure 12 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à vérifier sur les augets et les injecteurs

5.2.6.2 Mesurages géométriques à l'aide de gabarits

L'homologie géométrique entre le modèle et le prototype peut être vérifiée à l'aide de gabarits. Il convient que les gabarits soient identiques en taille, en décalage et en positionnement entre le prototype et le modèle. Toutefois, il faut prendre en considération le fait qu'il peut être difficile de positionner les gabarits en fonction du composant.

5.2.6.3 Mesurages géométriques à l'aide de machines de mesure des coordonnées (CMM)

Les machines de mesure des coordonnées sont fondées sur des méthodes et technologies différentes. Elles peuvent être classées en fonction du type de système de support de la sonde (par exemple, pont, bras articulé), du type de sonde (par exemple, sonde mécanique, optique/scanner) ou du type de commande (par exemple, manuelle, numérique). Quel que soit leur type, toutes les machines CMM fournissent un grand nombre de points de coordonnées tridimensionnelles qui sont enregistrés dans un fichier de données, puis traités à l'aide d'un logiciel spécialisé.

Les données mesurées peuvent être traitées de plusieurs manières; par exemple, si des sondes mécaniques avec des sphères sont utilisées, le point central mesuré de la sonde est corrigé avec le rayon de la sphère. Un logiciel spécialisé est disponible avec la CMM pour l'exécution de ces tâches.

Avant le contrôle dimensionnel, une vérification préliminaire de la CMM certifiée doit être effectuée à l'aide d'un étalon.

Pour vérifier l'homologie à l'aide de la CMM, la partie CAO correspondante de la conception théorique doit être utilisée. L'acheteur doit donc être en mesure de vérifier que la même configuration CAO est utilisée lors de la vérification de l'homologie du modèle et du prototype. Les méthodes suivantes peuvent être utilisées pour protéger la propriété intellectuelle du fabricant:

a) Mode gabarit de CMM:

- En général, quatre sections longitudinales et quatre sections transversales par auget sont exigées. Les coordonnées absolues d'un total d'environ 100 points sont communiquées à l'acheteur.

b) Mode mappage de CMM:

- Un nombre arbitraire de points est mesuré sur le modèle;
- Le fichier ASCII (texte) qui contient les coordonnées est stocké et signé numériquement à l'aide d'un algorithme officiellement vérifié (tel que NIST FIPS 180-4 ou SHA-3) ou conservé dans une enveloppe scellée;
- Le fabricant doit fournir à l'acheteur les résultats qui présentent les écarts par rapport à la conception hydraulique théorique;
- Lors de la vérification du prototype, le fichier ASCII qui contient les coordonnées est utilisé pour démontrer que la configuration CAO utilisée est la même que lors de la vérification du modèle (sauf que les valeurs doivent être mises à l'échelle entre le modèle et le prototype).

Ces méthodes ne fournissent que quelques exemples de moyens de protection de la confidentialité de la conception théorique du fabricant. La liste des exemples n'est pas exhaustive et toute procédure convenue d'un commun accord peut être utilisée.

5.2.7 Exactitude des mesurages

Étant donné qu'une description détaillée des méthodes et des exactitudes de mesure ne relève pas de l'objet du présent document, les recommandations suivantes sont données:

- Une description détaillée de l'instrument de mesure utilisé ainsi qu'une description de l'exactitude et de la répétabilité associées doivent être fournies;
- L'erreur totale comprend l'erreur causée par le positionnement du système de coordonnées, l'erreur systématique de l'instrument de mesure et l'erreur aléatoire;

- Un meilleur ajustement des données calculées par une CMM peut seulement indiquer la conformité de la surface d'un composant particulier au dessin, mais ne garantit pas le positionnement correct du composant dans l'espace tridimensionnel ou par rapport à d'autres composants.

5.2.8 Dimensions du modèle et du prototype à vérifier

5.2.8.1 Généralités

Les dimensions de tous les composants importants qui définissent les passages d'eau doivent être vérifiées dans une mesure acceptable pour les parties concernées.

Les dimensions et tolérances pertinentes pour les turbines Pelton sont définies en 5.2.9. Lorsqu'un emplacement est défini par plus d'une dimension, la tolérance ne s'applique qu'à la dimension la plus pertinente. Dans la mesure du possible, les dimensions du passage d'eau en contact avec le liquide doivent être utilisées.

Le contrôle de la similitude géométrique comprend à la fois:

- a) un contrôle de l'homologie des composants individuels avant l'assemblage. Pour des raisons pratiques, les dimensions doivent renvoyer au composant lui-même;
- b) un contrôle de l'homologie de la machine dans son ensemble, c'est-à-dire avec les composants assemblés. Les dimensions hors-tout pertinentes renvoient généralement à l'axe de la roue. Une attention particulière doit être accordée aux passages d'eau formés par la transition entre des composants adjacents, fixes ou rotatifs, pour lesquels aucune valeur générale de tolérance ne peut être requise dans le présent document.

Au paragraphe 5.2.8, les écarts maximaux admissibles renvoient soit à la valeur moyenne correspondante du modèle mis à l'échelle, soit aux dimensions de référence suivantes:

D diamètre de référence (voir la Figure 2);

P_i pas de l'auget;

d diamètre de l'orifice de l'injecteur (voir la Figure 12);

B largeur intérieure maximale de l'auget de roue (voir la Figure 12);

Les termes utilisés dans les paragraphes suivants pour désigner les différents composants des machines hydrauliques sont définis dans l'IEC TR 61364.

5.2.8.2 Principaux composants en contact avec le liquide

5.2.8.2.1 Généralités

Les principaux éléments à vérifier comprennent:

- les dimensions principales de la roue, du collecteur, du corps et des injecteurs (voir la Figure 11);
- le nombre d'augets;
- la forme des augets, des injecteurs et des pointeaux (voir la Figure 12);
- l'alignement des jets par rapport à la roue;
- la rugosité et l'ondulation de surface des augets, des injecteurs et des pointeaux (habituellement et uniquement pertinent pour le prototype) (voir les 5.2.10.2 et 5.2.10.3).

5.2.8.2.2 Roue de turbine Pelton

Le profil d'au moins un auget doit être vérifié sur au moins quatre sections transversales et quatre sections longitudinales ou, de manière aléatoire, sur toute la surface. Voir la Figure 12. Une attention particulière doit être accordée à proximité de l'entaille et du bord de sortie.

La position et l'inclinaison de l'auget dans la roue doivent être vérifiées. Voir la Figure 12.

L'angle de décharge β de chaque auget doit être vérifié en quatre points de chaque côté. Voir la Figure 12.

La forme de la découpe, l'angle γ de l'arrière de la découpe, le bord du séparateur de sortie et l'inclinaison de l'auget α doivent être vérifiés sur au moins trois augets. Voir la Figure 12.

La largeur et le profil intérieurs de l'auget doivent être vérifiés.

Le profil extérieur de l'auget doit également être vérifié. Pour garantir que l'interférence entre le jet et l'auget sur le prototype est toujours inférieure à celle sur le modèle, les tolérances du profil extérieur doivent être appliquées à la zone de décharge de l'auget qui peut influencer cette interférence. Voir le 5.2.9.

5.2.9 Écarts maximaux admissibles de la similitude géométrique entre le prototype et le modèle

Les points suivants s'appliquent:

- la valeur de référence est la moyenne du modèle mis à l'échelle ($\lambda_L L_M$), sauf indication contraire;
- lorsque la surface de l'auget est bien définie, la détermination indépendante des angles peut être omise;
- lorsqu'un profil complet de l'auget est fourni, l'épaisseur T de l'auget n'est pas exigée.

Tableau 2 – Écarts maximaux admissibles

	Valeur de référence	Écart maximal admissible		
		Tolérance d'uniformité		Tolérance de similitude
		Modèle	Prototype	Prototype/Modèle
		Valeur individuelle par rapport à la valeur moyenne	Valeur individuelle par rapport à la valeur moyenne	Valeur moyenne du prototype par rapport à la valeur moyenne du modèle mis à l'échelle ($(L_P - \lambda_L L_M)/(valeur\ de\ référence)$)
Passages d'eau métalliques ou en béton (collecteur, corps, canal de fuite)	Valeur moyenne	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 1 \%$
Diamètre du pointeau et de l'injecteur	d	$\pm 0,3 \%$	$\pm 0,3 \%$	$\pm 0,3 \%$
Profil du pointeau et de l'injecteur	d	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$
Longueur de l'injecteur (torpille, nervure)	Valeur moyenne	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$
Épaisseur de la nervure	Valeur moyenne	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$
Angle de l'injecteur	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Angle du pointeau	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Largeur intérieure de l'auget B	Valeur moyenne	$\pm 0,3 \%$	+0,8 –0,5 %	+0,8 –0,5 %
Profil extérieur de l'auget	B	$\pm 0,5 \%$	+1 –0,8 %	+1 –0,8 %
Profil intérieur de l'auget	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$
Inclinaison de l'auget α	1	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$

		Écart maximal admissible		
		Tolérance d'uniformité		Tolérance de similitude
		Modèle	Prototype	Prototype/Modèle
	Valeur de référence	Valeur individuelle par rapport à la valeur moyenne	Valeur individuelle par rapport à la valeur moyenne	Valeur moyenne du prototype par rapport à la valeur moyenne du modèle mis à l'échelle $(L_P - \lambda_L L_M) / (\text{valeur de référence})$
Angle de décharge de l'auget β	1	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Profil de découpe (intérieur / extérieur)	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$
Diamètre du cercle du jet D	Valeur moyenne	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$
Décalage du jet par rapport à la roue e	B	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,25 \%$
Alignement du jet par rapport à la roue δ	1	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
Pas de l'auget au diamètre extérieur P_i	B	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$
Épaisseur de l'auget à la sortie	B	+1 –0,5 %	+1 –0,5 %	+1 –0,5 %
Diamètre de tête de l'auget	D	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$

5.2.10 Ondulation et rugosité de surface

5.2.10.1 Caractéristiques géométriques

5.2.10.1.1 Ondulation

L'ondulation est l'écart d'un profil de surface par rapport à une courbe de conception lisse. L'ondulation est exprimée comme le rapport entre l'écart maximal et la distance sur laquelle se produit l'écart par rapport à la courbe lisse. Il s'agit du rapport X/U de la Figure 13. Un bâton souple qui se conforme facilement à la forme de l'auget est un exemple d'outil pouvant être utilisé pour évaluer l'ondulation. Afin de distinguer l'ondulation de la rugosité de surface, il convient que U ne soit pas inférieur à 50 mm. Il convient que le point d'écart maximal X se situe dans le tiers médian de U .

Les bosses à la surface sont plus difficiles à évaluer que les creux. Cependant, elles sont généralement plus faciles à corriger.

5.2.10.1.2 Rugosité de surface

La rugosité de surface est la qualité caractéristique de la surface due à de petits écarts par rapport à sa forme générale, tels que ceux produits par l'action de coupe des arêtes d'outils, des grains abrasifs, de l'alimentation de la machine, du revêtement et de la peinture ou produits à l'origine par le processus de fabrication (soudage).

Elle est caractérisée par le critère de rugosité R_a (écart moyen arithmétique du profil d'évaluation) défini dans l'ISO 4287:1997.

5.2.10.2 Exigences en matière d'ondulation

Pour satisfaire aux exigences d'homologie géométrique, l'ondulation du prototype doit être mesurée et les valeurs maximales admissibles sont énumérées ci-dessous.

L'ensemble de la surface des principaux composants en contact avec le liquide, tels qu'ils sont décrits en 5.2.8.2, doit être vérifié pour établir que les profils sont des courbes lisses et continues avec une valeur d'ondulation inférieure à $\pm 0,01$.

Pour les surfaces dont le profil varie en fonction de la distance entre les points de contact (entre 10 mm et 50 mm), l'ondulation acceptable doit être inférieure à $\pm 0,02$. Il est important de souligner que le critère d'ondulation tel qu'il est défini est utilisé pour évaluer une surface continue après usinage et meulage. Cela exclut toute ondulation qui fait partie du profil de conception.

Dans le cas des composants usinés par CNC, il convient de pouvoir atteindre une exactitude du processus de fabrication avec une valeur d'ondulation inférieure à $\pm 0,004$ et $\pm 0,002$ pour les surfaces soumises à la cavitation. Il convient qu'un processus d'usinage entièrement contrôlé (par exemple, en limitant la hauteur de l'échancrure à 0,2 mm entre deux passes adjacentes) assure un profil lisse et continu dans les valeurs d'ondulation recommandées après le meulage.

Pour le mesurage de l'ondulation, il convient que la distance minimale typique entre les points de contact de deux crêtes ne soit pas inférieure à 10 mm. Lorsque la distance entre les points de contact est inférieure à 10 mm, il convient de remplacer le mesurage de l'ondulation par un mesurage de la rugosité.

Il convient de ne jamais utiliser les critères d'ondulation pour évaluer les trous, les défauts, la porosité, le manque de matériau, les changements brusques du profil de la surface ou l'appariement des joints.

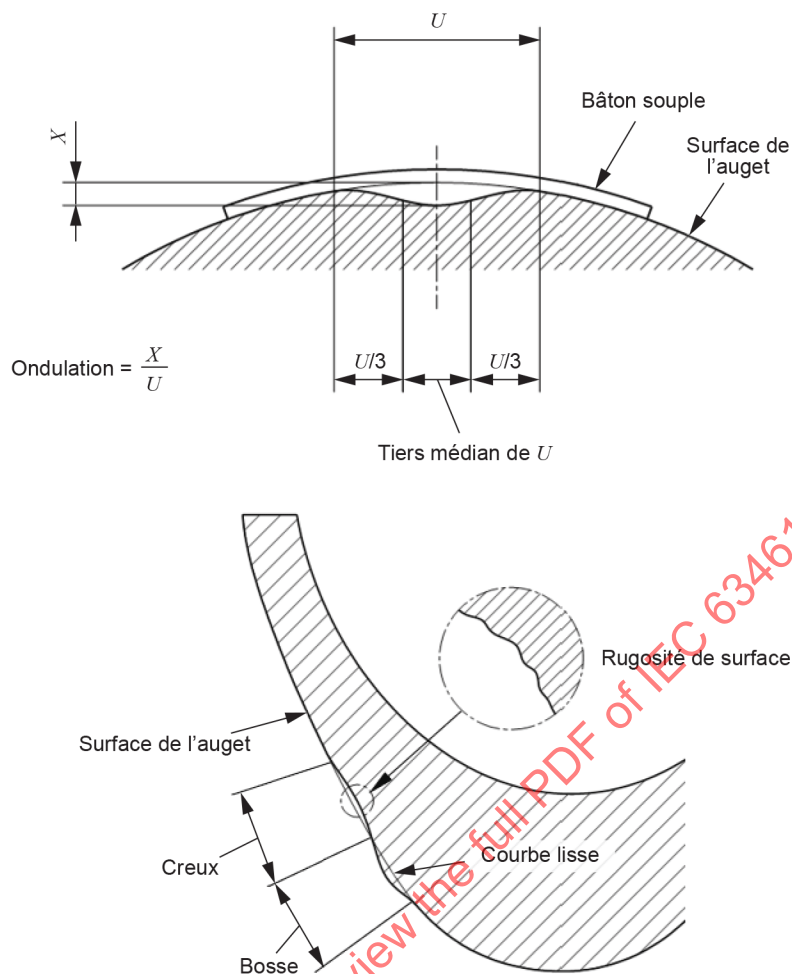


Figure 13 – Définition de l'ondulation et de la rugosité de surface

5.2.10.3 Exigences en matière de rugosité

Les surfaces rugueuses dans les passages d'eau des machines modèles et prototypes réduisent le rendement au-dessous de la valeur potentiellement réalisable.

Lorsque l'effet de la rugosité de surface sur les performances n'est pas pris en considération, il convient que le modèle et le prototype soient conçus de manière à obtenir un écoulement hydraulique fluide. Cependant, cela est difficile à réaliser sur le prototype. C'est pourquoi les valeurs maximales recommandées pour la rugosité de surface du prototype sont indiquées ci-dessous.

Les recommandations relatives aux valeurs de rugosité de surface sont données dans le Tableau 3 pour différents types de machines, correspondant approximativement aux machines à hauteur de charge faible à moyenne et aux machines à hauteur de charge élevée.

Les valeurs de rugosité de surface du prototype sont valables pour l'état fini de la surface. Cela signifie que lorsque les composants hydrauliques en contact avec le liquide ont des surfaces peintes ou revêtues, cet état doit être vérifié.

En outre, le fini exigé peut être choisi à certains endroits pour améliorer la résistance à la cavitation ou pour des raisons de fatigue; le choix du fini n'est alors pas lié à la similitude dimensionnelle entre le modèle et le prototype.

Les valeurs indiquées dans le Tableau 3 sont des valeurs maximales recommandées pour la surface totale du composant concerné, surfaces finies et peinture éventuelle comprises. La rugosité de surface maximale recommandée dans le Tableau 3 ne permet pas nécessairement d'obtenir des conditions d'écoulement hydrauliques fluides.

Tableau 3 – Rugosité de surface maximale recommandée pour le prototype R_a

Composant	R_a μm			
	E	$> 5\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	E	$> 5\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
Surfaces mouillées des augets, du pointeau et de l'orifice de l'injecteur:		$\leq 3,2$		$\leq 1,6$
Surfaces mouillées de l'injecteur:		$\leq 6,3$		$\leq 3,2$
Surfaces sèches de l'injecteur		$\leq 12,5$		$\leq 12,5$
Collecteur:		$\leq 25,0$		$\leq 12,5$

5.3 Procédures d'essai

5.3.1 Organisation des essais

5.3.1.1 Généralités

Lors de la planification des essais sur modèle, les spécifications données de 5.3.1.2 à 5.3.1.7 couvrant les aspects généraux de la préparation, de l'organisation et de la réalisation doivent être clarifiées et approuvées par les parties concernées.

5.3.1.2 Spécification des essais sur modèle

La spécification des essais sur modèle sert de base à la planification et à la préparation de l'essai de réception sur modèle et à la rédaction du programme technique détaillé des essais (voir le 5.3.3.2). Cette spécification des essais sur modèle fait souvent partie de la spécification technique ou commerciale générale de l'ensemble du projet, établie par l'acheteur ou son représentant.

La spécification des essais sur modèle doit notamment définir:

- l'objet, le domaine d'application et l'étendue des essais sur modèle;
- la référence aux données d'aménagement garanties et spécifiées;
- la référence aux normes d'essai;
- l'échelle et/ou les dimensions du modèle;
- le ou les lieux dans lesquels le ou les modèles sont soumis aux essais;
- la documentation des résultats (rapports d'essai);
- un calendrier qui indique, au moins, les dates de début et de fin des travaux pour les essais sur modèle;
- la propriété et/ou le stockage du modèle.

5.3.1.3 Calendrier

Il convient de convenir d'un calendrier qui indique, au moins, les différentes étapes, les délais ou la durée des éléments suivants:

- la soumission des dessins du modèle (en particulier ceux qui présentent la construction du modèle et les principales dimensions des côtés haute et basse pression du modèle au niveau de la transition vers le banc d'essai);
- la soumission de la procédure d'essai qui contient une description du matériel d'essai (y compris les méthodes d'étalonnage, de calcul et de représentation des résultats et les incertitudes de mesure attendues);
- l'étalonnage des instruments;
- la vérification de la configuration du modèle;
- les essais préliminaires et de réception (ou sur modèle réduit) et la séquence des modèles à soumettre à l'essai dans le cas d'essais comparatifs sur modèle;
- les rapports d'essai.

Le fabricant doit toujours disposer d'un délai suffisant pour fabriquer le modèle, en effectuant tous les contrôles dimensionnels nécessaires et en réalisant ses propres essais préparatoires, que ce soit dans son propre laboratoire ou ailleurs. En cas de défauts du matériel d'essai ou de la machine modèle survenant au cours des essais préliminaires ou de réception, un accord mutuel est nécessaire pour modifier le calendrier ou le programme d'essai.

5.3.1.4 Personnel et responsabilités

Il est important que les responsables de l'acheteur ou de son représentant, du fournisseur et du laboratoire indépendant (le cas échéant) soient désignés suffisamment tôt avant le début des essais. Leurs responsabilités et leurs pouvoirs doivent être précisés afin que tout problème qui survient au cours de la préparation et de la réalisation des essais puisse être rapidement résolu. L'acheteur et le fournisseur doivent avoir le droit de faire assister des représentants autorisés à tous les essais, inspections et contrôles dimensionnels contractuels du modèle et du prototype, afin de vérifier qu'ils sont effectués conformément au présent document et à tout accord antérieur.

Un chef d'essai doit être désigné pour la réalisation des essais (définis en 5.3.3.1). Le chef d'essai peut être choisi parmi le personnel technique du laboratoire dans lequel le modèle est soumis à l'essai ou, par accord spécial entre les parties, un expert indépendant peut officier en tant que chef d'essai. Le chef d'essai assume l'entière responsabilité de l'étalonnage correct des instruments, de l'exécution des essais et du calcul des résultats, y compris la détermination des incertitudes de mesure et la documentation des résultats dans le rapport d'essai final. Le chef d'essai doit prendre en considération toutes les remarques ou suggestions formulées par les représentants officiellement autorisés des parties prenantes aux essais.

Lorsque les essais sur modèle sont effectués dans un laboratoire indépendant ou externe, le fournisseur peut être présent pendant toutes les activités liées à l'essai de son modèle, y compris l'installation et les essais préparatoires. Concernant l'installation, le fournisseur peut faire participer son propre personnel qualifié.

Les essais doivent être effectués par du personnel qui a l'expérience du matériel d'essai.

5.3.1.5 Conception du modèle et préparation de l'installation d'essai

Afin de préparer le modèle et le matériel d'essai, la spécification technique des essais sur modèle (voir le 5.3.1.2) doit fournir toutes les informations détaillées pertinentes pour la conception et la fabrication de la machine modèle (voir le 5.1.3.2), telles que:

- l'étendue des passages d'eau à modéliser des côtés haute et basse pression;
- l'emplacement des sections de mesure de la pression;

- le nombre et l'emplacement des fenêtres d'observation;
- les dispositions relatives au changement ou à l'ajustement des composants du modèle;
- les dispositions relatives aux essais spéciaux (enregistrement vidéo ou photographique, mesurage du couple du déflecteur ou de la force du pointeau, aération, etc.);
- les conditions d'essai pour tous les types d'essais spécifiés;
- la plage de réglage des paramètres géométriques (par exemple, la course maximale des pointeaux, etc.);
- les simplifications géométriques éventuelles imposées par la fabrication du modèle sans incidence sur les performances.

En outre, des données suffisantes qui définissent l'étendue et les conditions de tous les essais doivent être fournies pour permettre la construction et la préparation du modèle selon l'état actuel de la technique. Il est alors possible de choisir l'installation d'essai appropriée et de vérifier la disposition générale du modèle dans le banc d'essai, en modifiant ou en réorganisant certains des composants existants du banc d'essai si cela est nécessaire.

Il est recommandé de convenir, à un stade précoce de la conception du modèle, des parties d'entrée et de sortie de l'écoulement ainsi que de l'emplacement définitif des sections de mesure de la pression et du nombre de prises de pression.

5.3.1.6 Instrumentation et traitement des données d'essai

La personne responsable du laboratoire ou le chef d'essai choisi doit fournir à l'acheteur, ou à son représentant, une description de l'instrumentation normalisée installée sur le banc d'essai, y compris des précisions sur les méthodes de mesure et d'étalonnage, sur le traitement des données d'étalonnage et d'essai et sur la documentation des résultats.

Dans certains laboratoires, deux instruments ou plus sont installés en permanence pour mesurer une grandeur particulière. L'un d'entre eux doit être choisi comme l'instrument dont les signaux ou les indications de mesure doivent être utilisé(e)s pour le calcul des résultats, et l'autre ou les autres ne doivent être utilisés qu'à des fins de référence et de contrôle fonctionnel.

Parfois, le calcul des résultats d'essai s'effectue en plusieurs étapes à l'aide de plusieurs systèmes informatiques. Dans ce cas, la procédure d'évaluation des grandeurs concernées doit être définie de façon détaillée. Un accord doit déterminer quelles grandeurs sont traitées en ligne et immédiatement présentées sur des enregistrements ou des diagrammes, et quels résultats d'essai sont calculés et documentés ultérieurement.

5.3.1.7 Contrôles dimensionnels

Les composants qui doivent être contrôlés avant, pendant ou après les essais de réception doivent être spécifiés. Les méthodes à utiliser pour les contrôles dimensionnels ainsi que l'étendue approximative et le nombre de dimensions à contrôler (voir le 5.2) doivent être convenus suffisamment tôt pour que les documents et les appareils de mesure pertinents puissent être préparés en conséquence. Si les parties en conviennent, des contrôles ponctuels peuvent être effectués pendant les essais de réception.

5.3.2 Inspections et étalonnages

5.3.2.1 Généralités

Peu avant le début des essais préliminaires ou de réception, le modèle, le banc d'essai, l'instrumentation et le système d'acquisition et de traitement des données doivent être soigneusement examinés par les représentants des parties et le chef d'essai, afin d'assurer que les résultats des essais ne sont pas affectés par des défauts mécaniques, structurels ou autres du modèle ou du matériel d'essai.

Il convient d'étalonner tous les instruments de mesure par rapport aux méthodes primaires ou secondaires avec des instruments certifiés (comme cela est précisé du 7.1 au 7.5) avant les essais et également après l'achèvement des essais lorsque l'une des parties le souhaite. Des réétalonnages pendant les essais sont nécessaires en cas de problèmes graves avec l'appareil de mesure normalisé (par exemple, un défaut d'un instrument ou d'une chaîne de mesure ou une déviation significative et systématique d'un signal de mesure dans des conditions nulles ou de référence).

Les méthodes à utiliser, l'étendue des différents étalonnages (contrôles ponctuels ou étalonnage complet) et la procédure doivent être convenues par les parties avant le début des essais préliminaires ou de réception. Sur la base de documents certifiés produits par le responsable du laboratoire ou le chef d'essai, il peut être convenu d'un commun accord, pour certains instruments, que les dernières données d'étalonnage existantes soient utilisées sans autres étalonnages ou vérifications.

5.3.2.2 Examen de la machine modèle

Les points à vérifier ou à enregistrer sont les suivants:

- l'identification des composants du modèle à l'aide de dessins correspondants (surtout s'il est prévu de remplacer ou de modifier certains composants pendant les essais);
- les dimensions géométriques énumérées en 5.2;
- les dimensions caractéristiques utilisées pour le calcul des résultats des essais (par exemple, les surfaces des sections de mesure haute et basse pression);
- les valeurs individuelles et moyennes des ouvertures des pointeaux;
- la qualité de la surface, les impuretés et les défauts locaux dans les différents composants;
- l'adéquation correcte des joints entre les composants;
- la conformité aux dimensions de référence qui figurent sur les dessins du modèle.

Si cela est nécessaire, ces vérifications doivent être répétées en cas de défaillances mécaniques ou de défauts au cours des essais (voir le 5.3.4), ou à la fin des essais sur modèle réduit, en présence des représentants autorisés de toutes les parties concernées. Ces vérifications font partie de l'essai formel de réception.

5.3.2.3 Examen du circuit d'essai

Au moins, les contrôles suivants doivent être effectués:

- il ne doit pas y avoir de fuite d'eau ou d'alimentation en eau entre le modèle et la section de mesure du débit;
- il ne doit pas y avoir de fuite d'eau au niveau des prises de pression et des conduites de mesure;
- les conditions d'écoulement à proximité de l'entrée et de la sortie du modèle et à proximité de la section de mesure du débit doivent être régulières. Les passages d'eau ne doivent pas présenter de perturbations et les surfaces mouillées doivent être de bonne qualité;
- les pompes de surpression et les dispositifs de régulation (vannes, alimentation en eau et en air pressurisé, etc.) doivent fonctionner correctement;
- la qualité et la température de l'eau doivent être stables (voir le 5.1.2.3).

Si cela est nécessaire, certains contrôles doivent être répétés à la fin des essais de réception, en présence de toutes les parties concernées.

5.3.2.4 Étalonnage des instruments et vérification du système d'acquisition de données

Les parties concernées doivent convenir:

- dans quelle mesure les différents instruments doivent être étalonnés ou vérifiés ponctuellement;
- lorsque tous les instruments doivent faire l'objet d'une vérification ponctuelle ou d'un étalonnage avant et après les essais de réception;
- les conditions de réétalonnage d'un instrument pendant ou après les essais de réception;
- la plage d'étalonnage et le nombre de points d'étalonnage ou de contrôle pour les différents instruments;
- les données de base et la procédure d'évaluation des incertitudes dues aux erreurs systématiques relatives aux données d'étalonnage et à chaque grandeur mesurée.

Avant et après les essais de réception, au moins les vérifications ou mesurages suivants doivent être effectués:

- identification des instruments ou appareils de mesure utilisés;
- "lectures de zéro", c'est-à-dire lectures dans des conditions bien définies pour les différents instruments, afin de détecter si des effets de dérive se sont produits au cours des essais;
- vérification du système d'acquisition des données par des mesurages répétés dans des conditions de fonctionnement bien définies. Des calculs manuels par échantillonnage doivent démontrer que l'acquisition, la transmission et le traitement des données d'essai fonctionnent correctement;
- mesurage du couple de frottement mécanique dans les paliers et les joints d'arbre qui ne sont pas intégrés ou reliés à un stator de type oscillant (produisant automatiquement le couple sur la roue), afin de décider s'il convient d'appliquer d'autres corrections.

Les "lectures de zéro" sont généralement vérifiées au cours des essais préliminaires et de réception. Tous les autres contrôles et étalonnages sont répétés, si cela est nécessaire, à la fin des essais de réception en présence de toutes les parties concernées.

Lorsque les différences entre les deux contrôles ou étalonnages comparés sont inférieures à l'incertitude due aux erreurs systématiques évaluées au début des essais, les données d'essai sont valides et il n'est pas nécessaire d'apporter une correction. Lorsque, entre les deux étalonnages ou vérifications, des différences supérieures à l'incertitude prévue due aux erreurs systématiques apparaissent en plusieurs points, l'essai doit être annulé et répété.

Afin de garantir la validité des résultats d'étalonnage, il est essentiel de maintenir les grandeurs d'influence (telles que la température et l'humidité ambiantes, l'alimentation électrique, le champ électromagnétique, etc.) dans une plage raisonnable pendant l'étalonnage et les essais (voir le 6.3.2.2.2).

Toute partie intéressée peut, pour des raisons déclarées et justifiées, demander un réétalonnage de tout instrument au cours d'un essai.

5.3.3 Exécution des essais

5.3.3.1 Types d'essais

5.3.3.1.1 Généralités

Toute partie intéressée peut, pour des raisons déclarées et justifiées, demander un réétalonnage de tout instrument au cours d'un essai. En fonction des résultats des essais préliminaires et des essais de réception, il peut être applicable d'effectuer des essais supplémentaires.

Pour faciliter l'identification de l'état d'avancement des essais et améliorer la communication entre les parties concernées, le présent document définit les types d'essais (voir du 5.3.3.1.2 au 5.3.3.1.5).

5.3.3.1.2 Essais préparatoires

Ces essais ne sont pas souvent spécifiés de façon détaillée, mais ils sont essentiels pour la qualité de tous les essais ultérieurs. Ils comprennent:

- des vérifications et des essais pour assurer que les performances du modèle ne sont pas affectées par des défauts mécaniques du modèle ou du banc d'essai et de l'appareil de mesure;
- une vérification du bon fonctionnement de l'appareil de mesure et du système d'acquisition de données.

Ces résultats sont normalement et uniquement réservés à l'usage interne du fournisseur ou du laboratoire.

En cas d'accord mutuel, il convient que le fournisseur dispose de suffisamment de temps pendant cette période pour choisir les composants définitifs ou procéder à des ajustements de dernière minute. Toutefois, ces essais de développement final ne relèvent pas du domaine d'application du présent document.

5.3.3.1.3 Essais préliminaires

Il s'agit d'essais couverts par la spécification technique (voir le 5.3.1.2) ou le programme technique (voir le 5.3.3.2), dont l'étendue dépend principalement de l'utilisation future des résultats. Par conséquent, les parties concernées doivent d'un commun accord, avant de commencer les essais, décider si:

- les résultats doivent être utilisés à titre d'information uniquement et n'ont pas de valeur contractuelle. Dans ce cas, les essais préliminaires ne servent qu'à explorer le comportement général ou certaines limites du modèle par rapport à des éléments spécifiés;
- ou si les résultats sont utilisés de façon officielle et ont une valeur contractuelle. Dans ce cas, ces résultats font partie des données d'essai officielles à compléter ou à vérifier ponctuellement lors des essais de réception. Par exemple, les résultats peuvent être utilisés pour établir le gain de rendement, expliqué en 8.6.2.3, et les incertitudes dues aux erreurs systématiques et aléatoires, expliquées en 6.3.2. Toutefois, ces données doivent être confirmées au cours des essais de réception.

5.3.3.1.4 Essais de réception (ou essais sur modèle réduit)

Ces essais mesurent, établissent ou vérifient toutes les données pertinentes du modèle qui sont définies par la spécification technique (voir le 5.3.1.2) ou le programme technique (voir le 5.3.3.2), et qui constituent la base de la comparaison avec les garanties ou d'autres données spécifiées contractuellement.

Tous ces résultats ont une valeur contractuelle et doivent être résumés dans le rapport d'essai final (voir le 5.3.6).

5.3.3.1.5 Essais complémentaires

Il s'agit d'essais qui complètent les résultats des essais préliminaires et de réception et qui peuvent inclure des essais pour des données supplémentaires expliquées à l'Article 10. Ces essais peuvent être effectués sur modèle réduit.

Les résultats sont résumés dans le rapport d'essai final (voir le 5.3.6). Toutefois, leur valeur contractuelle éventuelle doit faire l'objet d'un accord.

5.3.3.2 Programme technique

Un programme technique, se référant à la spécification technique (voir le 5.3.1.2) et aux garanties et données contractuelles pertinentes, doit être établi à l'avance et approuvé par les parties concernées. Lorsque le programme n'est pas couvert par les documents contractuels, il doit définir l'objet et l'étendue des différents types d'essais à réaliser au cours des essais préliminaires ou de réception. Pour permettre une progression efficace des essais et de la documentation, les éléments suivants doivent être spécifiés pour chaque type d'essai, tel que les essais de performance hydraulique principale, les essais d'emballage, etc.:

- les plages de paramètres hydrauliques à faire varier et les incréments correspondants, afin de définir le nombre et la répartition des points d'essai;
- les conditions d'essai à maintenir constantes, c'est-à-dire généralement la vitesse d'essai (ou l'énergie hydraulique massique);
- le nombre et le type de données d'essai à enregistrer et la méthode d'enregistrement;
- les définitions, formules et procédures (voir le 8.6.1) à utiliser pour le calcul des résultats du modèle et/ou du prototype;
- les lignes directrices pour la représentation graphique des résultats d'essai.

Si cela nécessaire, pour les essais de réception, le programme technique peut être complété afin de clarifier et de définir, par exemple:

- l'étendue et la séquence des vérifications, des étalonnages et des essais à effectuer sur modèle réduit;
- l'enregistrement et/ou la représentation graphique des données d'essai à signer par les parties aux essais;
- le nombre et la définition du ou des points d'essai à mesurer pour un calcul détaillé de l'échantillon et pour l'évaluation des incertitudes dues aux erreurs systématiques et aléatoires en vue de la détermination des incertitudes totales;
- l'élaboration d'un registre journalier et d'un protocole final (voir le 5.3.3.8).

5.3.3.3 Données à utiliser pour le calcul des résultats

Avant le début des essais préliminaires ou de réception les données et les formules à utiliser pour le calcul des résultats du modèle et du prototype doivent être vérifiées et approuvées. Ces données sont les suivantes:

- l'aire de la section de mesure haute pression;
- les références et données géométriques et hydrauliques du modèle et du prototype;
- les constantes et propriétés physiques du modèle et du prototype;
- le couple de frottement du modèle (s'il n'est pas compensé automatiquement);
- les données d'étalonnage de tous les instruments pertinents;
- la procédure d'augmentation du rendement.

Un exemple de calcul doit démontrer l'utilisation correcte de ces données et expliquer la procédure de calcul.

5.3.3.4 Signature et traitement des dossiers d'essai

Les dossiers complets des données mesurées du modèle et des données correspondantes aux conditions nulles ou de référence, ainsi que les notes relatives aux inspections et aux étalonnages, les lectures et les observations effectuées pendant les essais de réception ou les essais préliminaires doivent être convenus et signés par les parties témoins et par le chef d'essai immédiatement après l'achèvement de chaque phase, et conservés en tant que jeu complet par chaque partie.

5.3.3.5 Essais de performance

Au moins dans la plage de garantie, les essais de performance doivent être effectués à énergie hydraulique massique constante d'essai. Pour le calcul des résultats d'essai (voir le 8.6), il est préférable d'effectuer les essais à température constante de l'eau (si possible). Lorsqu'en raison de limitations du modèle ou de l'installation d'essai, des conditions d'essai constantes ne peuvent être maintenues, le paragraphe 8.6.2.1 explique le traitement ultérieur exigé pour ces résultats d'essai de performance. Il est recommandé de déterminer l'élévation de l'eau d'aval à laquelle les performances sont affectées. Cette vérification doit être effectuée à certains points de fonctionnement à pleine charge, en faisant varier le niveau aval.

5.3.3.6 Essais d'emballement

La méthode d'essai d'emballement dépend de la conception du banc d'essai, de l'instrumentation et de la conception du modèle. Lorsque le banc d'essai est, ou peut être, équipé d'un moteur d'entraînement pour compenser le couple de frottement dû aux paliers et joints d'arbre, il est généralement possible de maintenir $P_{mM} = 0$, et donc d'établir directement les points des caractéristiques d'emballement. Lorsque cette procédure n'est pas possible, les conditions d'emballement peuvent être déterminées par extrapolation (voir l'exemple de la Figure 39) ou par interpolation.

Dans la plupart des cas, l'énergie hydraulique massique est réduite, de sorte que la vitesse la plus élevée pouvant être supportée par le modèle ou l'installation d'essai ne soit pas dépassée. L'influence des nombres de Reynolds et de Froude est par hypothèse négligeable dans la plage proche de l'emballement.

Les essais d'emballement doivent être effectués avec une variation suffisante des paramètres géométriques de la machine modèle, de sorte que la combinaison de paramètres la plus défavorable et toutes les conditions spécifiées soient couvertes. Pour les turbines Pelton à jets multiples, la vitesse maximale d'emballement stabilisé doit être mesurée en tenant compte de la combinaison la plus défavorable des injecteurs en service.

Le paragraphe 8.6.3.1 explique comment les caractéristiques d'emballement du modèle sont déterminées pour les turbines Pelton et la Figure 39 donne quelques exemples de représentation graphique du facteur de vitesse d'emballement $n_{ED,R}$.

5.3.3.7 Essais de vérification des données supplémentaires

Les procédures appliquées pour les essais, tels que:

- le couple du déflecteur;
- la force du pointeau de l'injecteur;
- l'influence du niveau aval sur le rendement;
- etc.;

sont décrites à l'Article 10, qui détaille les aspects pertinents de ces essais supplémentaires.

5.3.3.8 Registre journalier et protocole final des essais de réception

Un registre quotidien doit résumer, pour chaque jour, les éléments suivants:

- les noms des personnes qui participent aux essais;
- les activités telles que les vérifications, les étalonnages, les séries d'essais, les discussions;
- les accords, les décisions et les questions non résolues concernant les résultats des essais;
- les modifications apportées au programme technique ou au programme d'essai.

À la fin des essais de réception, un protocole final doit être établi, couvrant au moins les points suivants:

- l'objet des essais de réception;
- le lieu et la date des essais;
- les noms des personnes participantes;
- l'identification du modèle ou des composants du modèle;
- les commentaires ou conclusions sur:
 - l'inspection du banc d'essai, de l'instrumentation et de l'installation du modèle;
 - l'étalonnage des instruments;
 - le calcul de l'échantillon (système d'acquisition de données);
 - la vérification de la configuration du modèle;
- la discussion des résultats et la comparaison avec les données garanties ou spécifiées, couvrant au moins les éléments suivants:
 - les essais de performance;
 - les essais d'emballage;
- les conclusions indiquant si:
 - les garanties et les spécifications ont été satisfaites;
 - les résultats d'essai sont exhaustifs par rapport au programme technique et à la spécification technique des essais sur modèle;
- les accords sur:
 - les essais supplémentaires (le cas échéant);
 - la documentation des résultats d'essai;
 - l'expédition ou le stockage du modèle.

5.3.4 Défauts et répétition des essais

5.3.4.1 Types de défauts et conséquences

Au cours des essais de réception, des défauts peuvent survenir dans le modèle, le banc d'essai, l'instrumentation ou le traitement des données, tels que:

- a) défauts mécaniques du modèle:
 - les paliers ou les joints du modèle sont défectueux et entraînent une modification des pertes par frottement mécanique. Il est nécessaire de monter les paliers ou joints de remplacement, mais les pertes par frottement mécanique peuvent avoir changé;
 - les jeux de fonctionnement peuvent avoir changé, ce qui modifie les performances hydrauliques;
 - un défaut mécanique se produit sur la roue ou sur d'autres composants du modèle.
- b) défauts du banc d'essai ou de l'instrumentation:
 - des variations inhabituelles de la vitesse, de l'énergie hydraulique massique ou du débit sont introduites en raison de défauts dans les systèmes de commande auxiliaires du banc d'essai ou en raison d'un mauvais fonctionnement des composants;
 - des fuites supplémentaires dues à une vanne ouverte ou à un défaut des conduites de mesure sont détectées;
 - un décalage excessif des indications de l'instrument aux conditions nulles avant et après une série d'essais est détecté.

c) défauts dans le traitement des données:

- un mauvais fonctionnement du système d'acquisition des données peut produire des résultats d'essai erronés;
- des résultats d'essai erronés sont obtenus en raison de données de référence ou d'étalonnage incorrectes.

La correction de ces défauts doit être étroitement surveillée par le chef d'essai et toutes les parties concernées.

Dans les essais comparatifs, il faut particulièrement veiller à ce qu'aucune des parties ne soit avantagée par rapport aux résultats obtenus jusqu'alors. Les essais doivent être achevés comme ils ont commencé et sans modification de la conception hydraulique.

Il convient d'effectuer, après correction des défauts, plusieurs essais préparatoires ou préliminaires pour assurer que le modèle se comporte exactement comme il le faisait avant que les défauts ne se produisent. Lorsque la modification de ses performances est prouvée, la série d'essais précédente doit, d'un commun accord:

- être maintenue et aucun autre essai n'est jugé nécessaire;
- ou être déclarée invalide et toute la série d'essais doit être répétée.

5.3.4.2 Procédure de répétition des essais

Chacune des parties doit avoir le droit de demander l'interruption ou la répétition des essais, à condition que le chef d'essai juge valables les raisons invoquées, par exemple:

- concordance insatisfaisante entre les étalonnages avant et après les essais;
- dysfonctionnement du banc d'essai, de l'instrumentation ou du traitement des données;
- défauts mécaniques du modèle;
- non-conformité, dans une mesure significative, au présent document, sauf s'il en a été convenu autrement au préalable.

Dans une telle situation, l'autre ou les autres parties ou le chef d'essai peuvent également exiger une répétition des essais. Il est recommandé que la question des essais répétés, des étalonnages répétés et de la prise en charge des coûts y afférents fasse l'objet d'un accord écrit préalable.

Lorsqu'aucun accord ne peut être trouvé sur la manière de procéder à une telle répétition d'essais ou sur la prise en charge des coûts supplémentaires, la question doit être soumise à un arbitre indépendant acceptable par toutes les parties.

5.3.5 Rapport d'essai préliminaire

Un rapport préliminaire peut être établi avant les essais sur modèle réduit. Il doit couvrir l'objet des essais, la description de la machine modèle et du banc d'essai, la procédure d'essai, l'incertitude et le calcul étape par étape d'un point de mesure, le rendement mesuré et les essais de vitesse d'emballement.

5.3.6 Rapport d'essai final

Après l'achèvement de tous les essais conformément à la spécification technique des essais sur modèle (voir le 5.3.1.2) et au programme technique (voir le 5.3.3.2), un rapport d'essai final doit être établi conformément aux règles énoncées dans le présent document et signé par le chef d'essai. Les parties doivent convenir de ce qu'un projet de rapport complet ou seulement certains chapitres doivent être approuvés avant la distribution de la version finale.

Le rapport final doit porter principalement sur les points suivants:

- 1) l'objet et le but des essais, avec référence à la spécification technique des essais sur modèle, y compris les garanties pertinentes et autres données contractuelles;
- 2) les enregistrements de tous les accords et autres documents essentiels relatifs aux essais;
- 3) le personnel qui participe aux essais;
- 4) la description de la machine modèle accompagnée de dessins présentant, au moins, la section principale du modèle et sa disposition générale dans le banc d'essai;
- 5) la description du banc d'essai et des appareils de mesure, y compris les méthodes d'étalonnage et le traitement des données;
- 6) le calcul des résultats des essais sur modèle et la transposition aux conditions du modèle contractuel ou du prototype (y compris la prise en considération des effets d'échelle, le cas échéant);
- 7) les données d'étalonnage et les rapports d'inspection;
- 8) les procédures d'essai pour les différents types d'essais;
- 9) le journal des activités liées aux essais spécifiés et la séquence des différents essais;
- 10) les relevés d'essais et les fiches de données concernant les mesurages et les observations des différents essais, ainsi que les résultats d'essai représentés graphiquement. Si les parties en conviennent, certaines données peuvent être transmises par voie électronique;
- 11) le calcul des incertitudes de mesure en se référant aux données d'étalonnage, aux résultats et à d'autres observations;
- 12) la discussion et l'interprétation des résultats d'essai et la comparaison avec les données garanties et autres données contractuelles;
- 13) les conclusions qui indiquent si les exigences garanties et contractuelles ont été satisfaites ou non, et si les essais sont au complet par rapport à la spécification technique.

6 Acquisition des données

6.1 Acquisition et traitement des données

6.1.1 Généralités

L'acquisition et le traitement des données impliquent la conversion des signaux mesurés en unités techniques appropriées par le biais d'une chaîne de mesure composée de plusieurs éléments tels que des transducteurs, des multiplexeurs, des convertisseurs ou conditionneurs de signaux, des équipements de stockage de données et des ordinateurs. Le résultat final est une présentation des paramètres sous forme de données de performance significatives.

Les mesurands sont des grandeurs fluctuantes. Cependant, leurs valeurs moyennes sont d'un grand intérêt pour la détermination des performances hydrauliques principales d'un modèle.

Quelle que soit la grandeur à mesurer, une attention particulière doit être accordée à la méthode de calcul de la moyenne d'un signal fluctuant pour obtenir la valeur moyenne réelle de la grandeur physique, et à l'analyse de ce signal pour caractériser la fréquence et l'amplitude des fluctuations.

Pour la terminologie, voir 3.2.

6.1.2 Exigences générales

La sortie du système d'acquisition et de traitement des données doit être le reflet fidèle du mesurande.

Des procédures d'étalonnage documentées doivent exister pour tous les instruments utilisés. Des enregistrements de tous les étalons et appareils de mesure utilisés pour établir la conformité aux exigences spécifiées doivent également être conservés.

Le cas échéant, il convient de rendre possible, au moyen de connexions parallèles pour constater *sur place*, l'étalonnage de tous les instruments de la chaîne de mesure par une méthode primaire qui permet de vérifier que le système complet d'acquisition de données représente le mesurande dans les limites spécifiées. Cela signifie généralement que le même chemin de signal, la même configuration matérielle et logicielle doivent être utilisés à la fois pour l'étalonnage et les essais de performance.

Lors d'un essai de performance, les moyennes de chacune des grandeurs mesurées doivent être obtenues par des mesurages effectués pendant le même intervalle de temps.

Une vérification possible de l'ensemble de la chaîne de mesure consiste à disposer d'instruments parallèles. Il est également préférable de pouvoir comparer les résultats du système d'acquisition de données et de l'instrument ou des instruments de référence, même dans les conditions de fonctionnement de la machine soumise à l'essai.

6.1.3 Acquisition des données

6.1.3.1 Généralités

Le système d'acquisition de données peut être organisé de différentes manières (y compris selon des méthodes manuelles) en fonction du matériel disponible et de la méthode de calcul de moyenne choisie.

Des configurations et exemples possibles de différents systèmes d'acquisition de données sont présentés. En général, une combinaison de différents systèmes est utilisée.

6.1.3.2 Système de multiplexage temporel

Dans un système de multiplexage temporel (Figure 14), les mesurandes sont mesurés par des multiplexeurs qui balayent séquentiellement les canaux un certain nombre de fois pendant une période donnée.

La valeur moyenne calculée du mesurande est utilisée pour des traitements ultérieurs.

6.1.3.3 Système de mesure parallèle

Dans un système fonctionnant en parallèle (Figure 15), les mesurandes sont mesurés par un ordinateur qui recueille les données directement sur chaque canal. Cette disposition permet l'enregistrement chronologique des données à grande vitesse et l'échantillonnage simultané de tous les canaux (voir le 6.1.4.5).

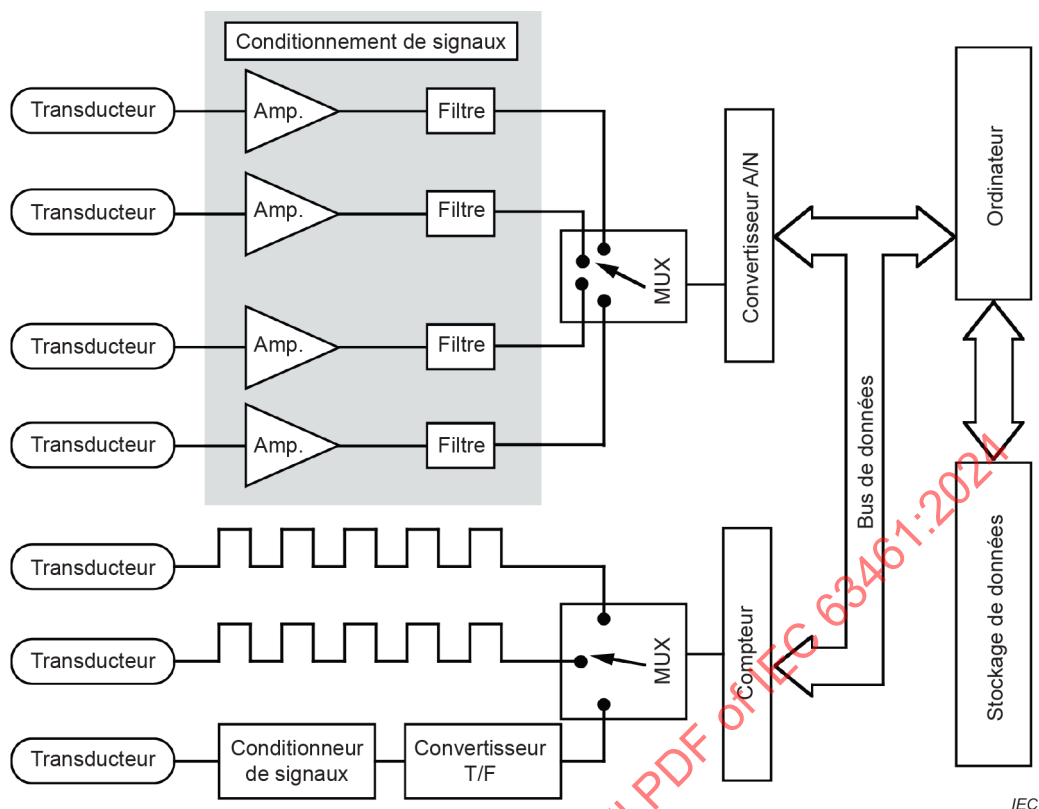


Figure 14 – Système d’acquisition de données à multiplexage temporel

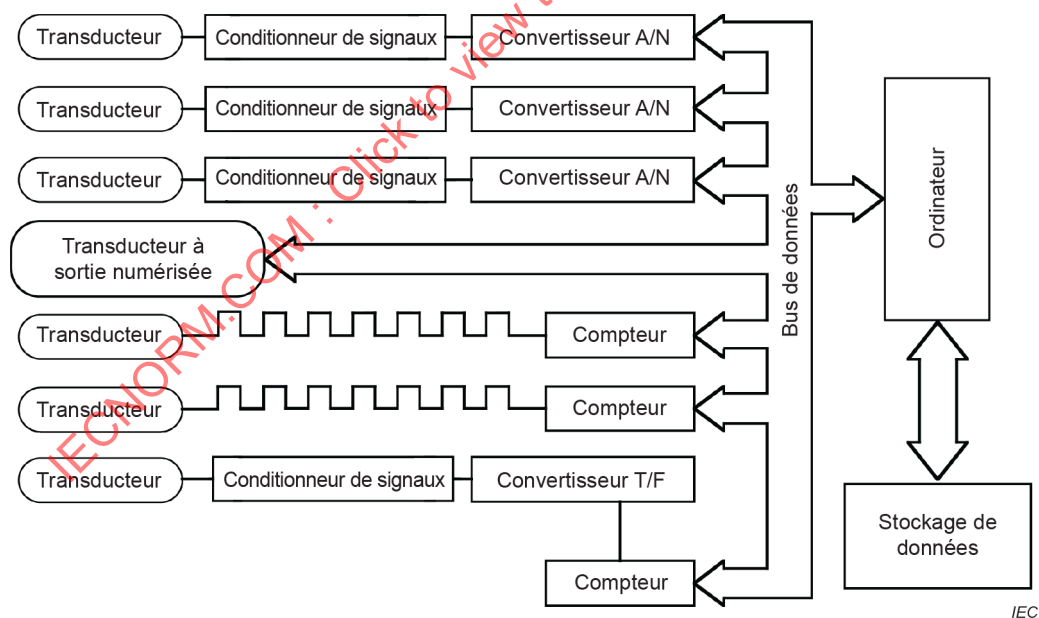


Figure 15 – Système d’acquisition de données à bus

6.1.4 Exigences relatives aux composants

6.1.4.1 Généralités

Les composants de la chaîne de mesure doivent être capables de gérer la plage de fréquences d'intérêt.

Les composants qui transmettent au mesurande des informations au sujet du transducteur, par exemple les conduites de pression, peuvent provoquer des effets parasites et des erreurs dans les mesurages.

Pour tous les composants de la chaîne de mesure, il est à noter que les variations de température, dans leur environnement, peuvent entraîner des erreurs de mesure en dehors des limites spécifiées.

Les propriétés telles que la linéarité et l'hystérésis doivent être documentées lors de l'étalonnage.

6.1.4.2 Transducteur

Il convient que les transducteurs utilisés pour le mesurage des paramètres de performance fonctionnent dans un environnement à température stable. Il convient de les placer dans un endroit dans lequel ils ne sont pas influencés par les variations de température, par exemple par la lumière directe du soleil, les panneaux chauffants, les canaux de ventilation, etc.

Le comportement dynamique des mesurandes doit être connu, car les transducteurs ne doivent être utilisés que dans le domaine fréquentiel pour lequel ils sont conçus.

Il convient d'être prudent lors de l'utilisation de transducteurs ayant une propriété d'amortissement inhérente spéciale ou un temps de réponse réglable, et de transducteurs ayant une déflexion extrêmement élevée de l'élément sensible. De tels transducteurs peuvent entraîner des erreurs de mesure dans les mesurages de moyenne et d'oscillation.

6.1.4.3 Câbles et terminaison

Le chemin du signal entre les transducteurs et l'amplificateur doit être conçu de manière à réduire le plus possible les influences externes sur les signaux (par exemple, causées par des lignes électriques ou des variations de température). Un blindage et une mise à la terre appropriés doivent être effectués. Les connecteurs et les terminaisons doivent avoir des propriétés mécaniques et électriques stables et fiables.

Même si toutes les précautions ci-dessus ont été prises, il est à tenir également compte des influences parasites du réseau électrique sur les résultats de mesure.

6.1.4.4 Conditionnement de signaux

6.1.4.4.1 Amplificateur

Pour exploiter la résolution du convertisseur A/N, la plage de sortie de l'amplificateur doit correspondre à la plage d'entrée du convertisseur.

L'amplificateur doit être placé le plus près possible du transducteur afin de réduire le plus possible l'influence de la montée du bruit dans le câblage.

Les sorties des transducteurs à sortie analogique sont souvent amplifiées et filtrées dans un bloc de conditionnement des signaux.

6.1.4.4.2 Filtre

Lors du choix des filtres, il convient de prêter une attention particulière aux propriétés suivantes:

- signaux de courant alternatif: fréquence de coupure, affaiblissement (ordre) et temporisation;
- signaux de courant continu: décalage, dérive en température et linéarité.

Dans les analyses pour lesquelles le mesurage simultané de deux ou plusieurs mesurandes est important, tenir compte des retards dans les systèmes de conditionnement et d'acquisition de données. Les filtres provoquent des retards (déphasage) qui dépendent du type de filtre et de la fréquence de coupure (Figure 16).

La fréquence de coupure d'un filtre passe-bas doit être au plus égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage afin d'éviter les effets de repliement spectral. Ceci est représenté à la Figure 17. Dans la pratique, cependant, une fréquence de coupure inférieure ou égale au tiers de la fréquence d'échantillonnage est utilisée.

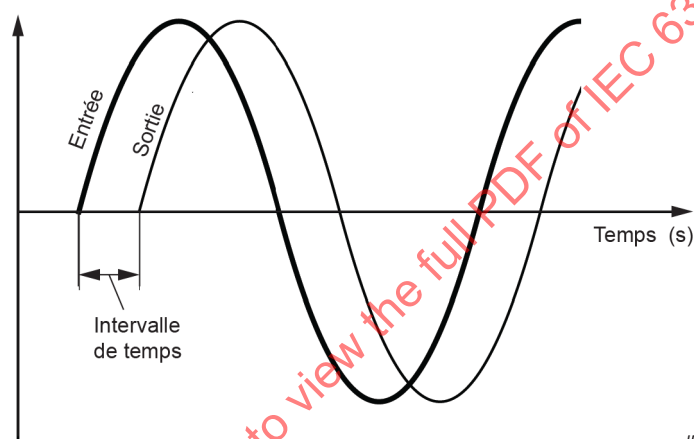
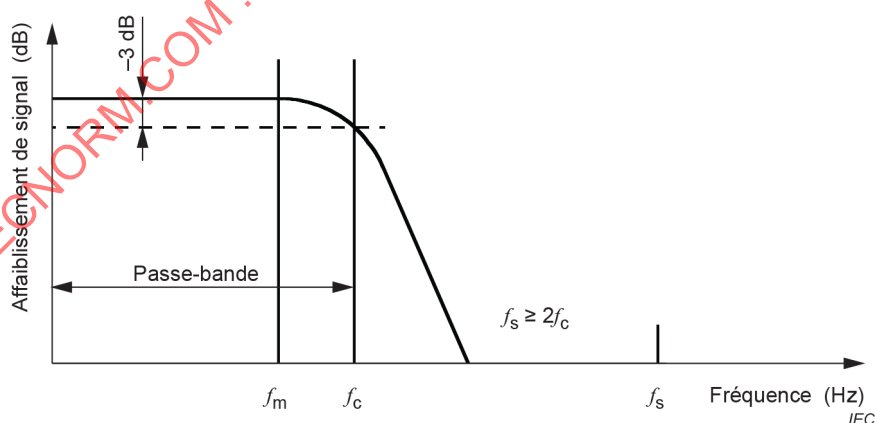


Figure 16 – Temporisation



Légende

- f_m Fréquence maximale du composant à l'étude
 f_c Fréquence de coupure d'un filtre passe-bas
 f_s Fréquence d'échantillonnage

Figure 17 – Caractéristiques d'affaiblissement des filtres passe-bas typiques

6.1.4.5 Multiplexeur

La vitesse de commutation effective du multiplexeur doit être comparée aux exigences relatives à chaque mesurande. Puisque le convertisseur A/N échantillonne plusieurs canaux de manière séquentielle, la fréquence d'échantillonnage de chaque canal est réduite proportionnellement au nombre de canaux.

Le système de commutation est généralement du type à relais ou à semi-conducteurs. La commutation par relais est généralement plus exacte que la commutation par semi-conducteurs, mais sa vitesse de commutation est plus faible. Lors de la commutation entre différents niveaux de tension, tenir compte des effets d'interférence entre les canaux voisins. En général, ces erreurs augmentent avec la vitesse de commutation.

6.1.4.6 Convertisseur analogique-numérique

Les signaux doivent être numérisés avant que le signal analogique continu ne puisse être lu par l'ordinateur.

Les paramètres importants pour les convertisseurs analogiques-numériques sont le temps de conversion, la résolution, l'exactitude, la plage d'entrée, la dérive en température et la linéarité.

La résolution d'un convertisseur A/N est définie comme le nombre de bits que le convertisseur utilise pour décrire le signal analogique. Un convertisseur 3 bits divise la plage en $2^3 - 1 = 7$ divisions.

Pour les essais de performance, une résolution minimale de 14 bits est exigée. Pour les mesurages dynamiques, une résolution inférieure peut être acceptée.

Pour effectuer des mesurages simultanés pendant la conversion A/N, un convertisseur A/N par canal ou un équipement d'échantillonnage et de maintien simultanés peut être utilisé.

6.1.4.7 Ordinateur

Le dispositif de commande du système d'acquisition de données est l'ordinateur. Il doit avoir les fonctions suivantes: configurer et synchroniser l'enregistreur de données, gérer le transfert de données, communiquer avec les périphériques, effectuer des calculs et présenter les résultats.

Il convient que l'interface de l'ordinateur ait un débit de transfert de données au choix (débit en bauds) qui lui permet de communiquer avec différents appareils sur le bus et de les contrôler.

6.1.4.8 Traitement des données

Les tâches logicielles typiques sont les suivantes:

- contrôle du système d'acquisition de données;
- calcul des coefficients d'étalonnage;
- conversion des valeurs électriques en unités techniques;
- calcul des valeurs moyennes et d'autres statistiques;
- calcul des données;
- évaluation de l'incertitude due aux erreurs aléatoires;
- présentation des résultats;
- stockage des données.

Les données brutes de chaque paramètre dans un essai de performance et réception doivent être disponibles après l'évaluation d'un point d'essai afin d'effectuer des calculs manuels et de vérifier le code informatique.

Si cela est possible, il convient d'afficher en continu pendant l'essai les données essentielles de performance pour donner un aperçu des performances du modèle et du système hydraulique auquel il est raccordé.

Le nombre d'échantillons et la fréquence d'échantillonnage doivent refléter les caractéristiques de l'ensemble de la chaîne de mesure afin d'obtenir:

- une valeur moyenne exacte pour les mesurages de performance;
- une détermination satisfaisante des caractéristiques nécessaires des mesurages oscillants.

6.1.5 Contrôle du système d'acquisition de données

6.1.5.1 Généralités

Chaque chaîne de mesure doit avoir un schéma complet qui présente ses principaux composants. Cela aide les parties à décider de l'endroit dans lequel il convient d'effectuer les contrôles lorsque des problèmes particuliers surviennent, ou du moment auquel les signaux oscillants ont besoin d'être examinés de plus près. La Figure 18 représente quelques chaînes de mesure typiques avec des suggestions d'essais et de points de contrôle.

6.1.5.2 Transducteur à sortie analogique

À la Figure 18, le point 1 est un point d'essai pour déterminer le comportement dynamique du mesurande.

Le bon fonctionnement du système de conditionnement de signaux peut être confirmé en corrélant les signaux au point d'entrée A avec le point d'essai 3.

Le bon fonctionnement de l'amplificateur peut être confirmé en corrélant les signaux au point d'entrée A avec le point d'essai 2.

Le bon fonctionnement du filtre peut être confirmé en corrélant les signaux au point d'entrée B avec le point d'essai 3.

Pour vérifier le bon fonctionnement du multiplexeur et du convertisseur A/N, un signal de référence peut être appliqué au point C et comparé à la sortie au point 5.

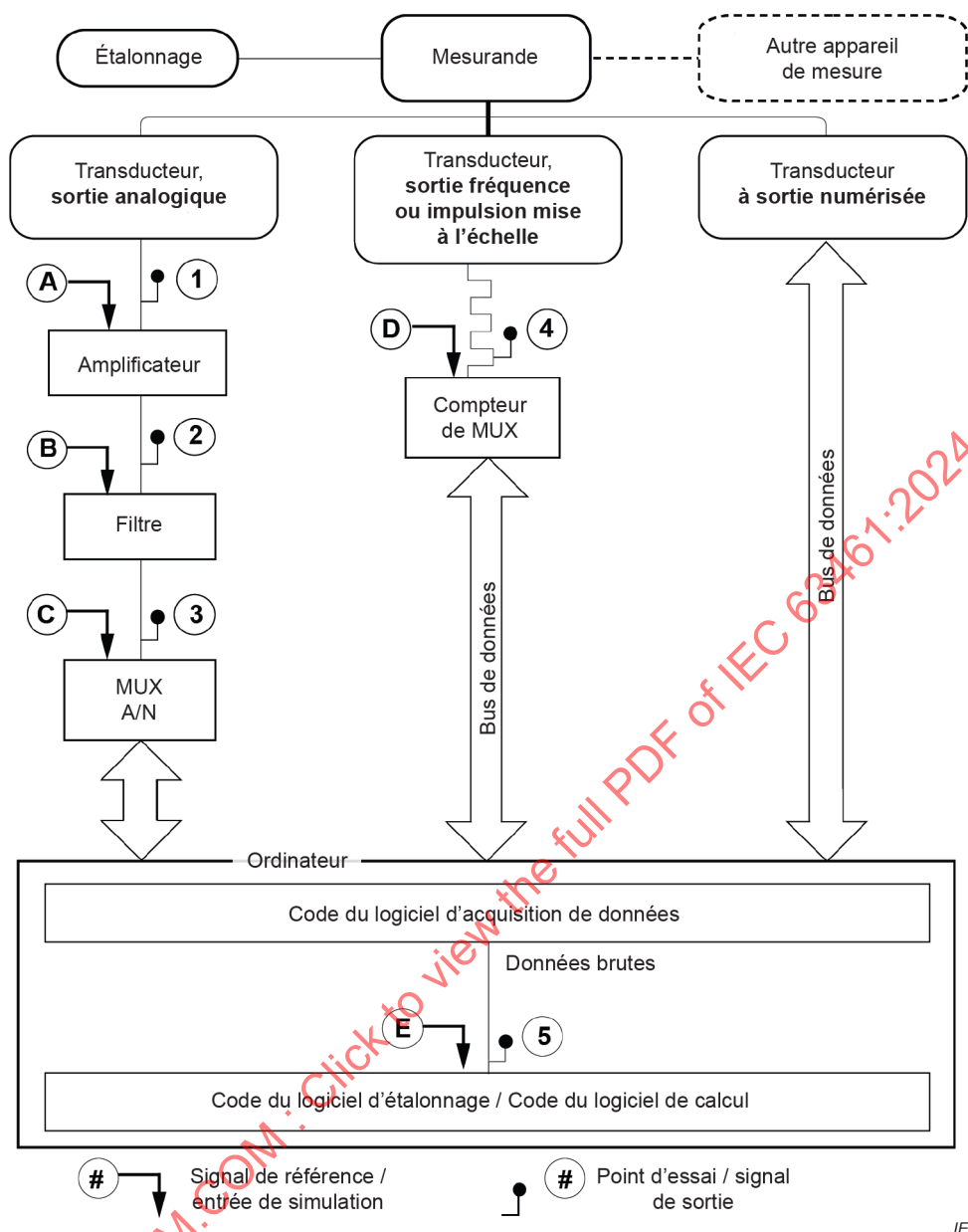


Figure 18 – Différentes chaînes de mesure et leurs points de contrôle recommandés

6.1.5.3 Transducteur à sortie fréquence ou impulsion mise à l'échelle

La qualité du signal doit être contrôlée au point 4 pour assurer un déclenchement correct du compteur. Un signal de référence peut être appliqué au point D pour vérifier la base de temps du compteur.

6.1.5.4 Transducteur à sortie numérisée

Le meilleur moyen de vérifier le transducteur et une chaîne de mesure de ce type est de procéder à l'étalonnage.

6.1.5.5 Vérification des effets dus au biais

Pour vérifier que le système de conditionnement de signaux ne produit aucun effet dû au biais, le signal de sortie du système peut être corrélé avec le signal d'entrée. Ce dernier peut être un signal de référence en provenance d'une source électrique distincte. Les points de contrôle sont indiqués à la Figure 18 aux points A et 3.

6.1.5.6 Code de logiciel

Le code de logiciel pour l'acquisition et le traitement des données peut être vérifié en utilisant les données brutes lues au point de contrôle 5, en vérifiant manuellement les calculs et en comparant ensuite les résultats avec ceux du code de logiciel.

L'algorithme de performance peut être vérifié en entrant des valeurs numériques au point E, ce qui donne un résultat de performance connu.

Il convient de documenter que les algorithmes utilisés pour l'étalonnage d'une chaîne de mesure sont équivalents à ceux utilisés dans le calcul des performances.

6.2 Acquisition et traitement des données pour le mesurage des grandeurs fluctuantes

6.2.1 Généralités

Le paragraphe 6.1 décrit le mesurage des valeurs moyennes des principales grandeurs de performance hydraulique. De nombreuses méthodes utilisées permettent également d'enregistrer la composante fluctuante de la grandeur.

Le présent paragraphe décrit les exigences relatives à l'acquisition et au traitement des données pour la détermination des grandeurs fluctuantes. Le traitement des données comprend le calcul, l'évaluation et la présentation des grandeurs statistiques qui représentent les mesurages du modèle.

La procédure de mesure, d'acquisition et de traitement des données doit être convenue avant les essais.

Les grandeurs mesurées sont:

- a) soit de nature périodique;
- b) soit de nature non périodique, stochastique et intermittente.

Les grandeurs fluctuantes peuvent être mesurées:

- c) avec leurs composantes moyennes (mesurage de $\bar{X}$ à la Figure 5);
- d) ou en tant que composantes fluctuantes uniquement (mesurage de $\tilde{X}$ à la Figure 5).

Les méthodes de mesure doivent permettre d'enregistrer les grandeurs fluctuantes avec une résolution suffisante pour décrire leurs caractéristiques. Les mesurages peuvent être effectués à l'aide:

- e) de transducteurs de pression;
- f) d'accéléromètres;
- g) de jauges de contrainte;
- h) d'autres transducteurs pour les grandeurs mécaniques.

Pour permettre une analyse plus poussée des données, la chaîne de mesure, du transducteur au système de stockage des données, doit satisfaire à plusieurs critères prévus par la théorie de l'analyse des signaux (voir la référence [16]). En particulier, les critères décrits en 6.1 doivent être appliqués. Toutefois, la nature fluctuante des grandeurs prises en considération dans le présent paragraphe conduit à des exigences supplémentaires décrites en 6.2.2.

6.2.2 Acquisition des données

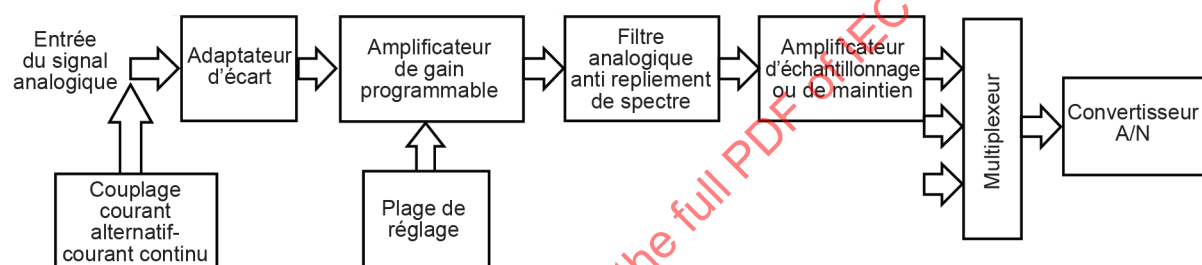
6.2.2.1 Conditionnement de signaux

L'objectif du mesurage et les méthodes d'acquisition et de traitement des données déterminent le conditionnement approprié du signal. Les principaux objectifs du conditionnement sont les suivants:

- l'élimination des bruits de haute fréquence pour éviter les effets de repliement spectral (filtre analogique);
- l'élimination des composantes du signal non pertinentes (filtre analogique, numérique ou méthodes logicielles);
- l'ajustement d'écarts.

6.2.2.2 Conversion analogique-numérique

La plupart des systèmes d'acquisition de données reposent sur un échantillonnage périodique suivi d'une conversion analogique-numérique. La Figure 19 représente un système typique d'acquisition de données.



IEC

Figure 19 – Système typique d'acquisition de données

Lorsque la valeur en régime permanent d'un signal n'est pas pertinente et qu'elle est supérieure à la valeur crête à crête, l'ajustement de l'écart peut améliorer la qualité de la composante fluctuante stockée du signal. Le couplage en courant alternatif des entrées du convertisseur peut induire des distorsions du signal dans les basses fréquences. Le décalage en courant continu sélectionnable ajoute une constante au signal analogique. La plage du signal peut être centrée sur la plage du convertisseur sans distorsion des basses fréquences.

Des amplificateurs de gain programmables adaptent la plage du signal analogique à la plage dynamique du convertisseur A/N.

Des filtres passe-bas analogiques anti-repliement de spectre doivent être utilisés pour l'échantillonnage périodique. La fréquence d'échantillonnage est limitée par les caractéristiques du filtre. L'échantillonnage simultané de tous les signaux peut être effectué à l'aide d'un amplificateur d'échantillonnage et de maintien sur chaque voie de mesure. Les signaux échantillonnés peuvent alors être multiplexés et convertis séquentiellement. Lorsque les signaux sont échantillonnés séquentiellement, le retard qui en résulte doit être pris en considération (voir le 6.2.2.5).

La plupart des convertisseurs analogiques-numériques utilisés dans l'analyse des signaux fournissent un flux de valeurs entières correspondant à des incréments discrets de l'entrée physique. Cette opération induit une perte irréversible de données et doit être effectuée avec précaution.

La résolution et la précision d'un convertisseur analogique-numérique déterminent sa qualité. La résolution est normalement exprimée en bits. Le bit de signe n'est pas toujours compté.

La qualité du signal numérisé dépend également de la correspondance entre les valeurs extrêmes du signal analogique et la plage du convertisseur. Par conséquent, chaque voie de mesure doit être conditionnée de manière que le signal corresponde le mieux possible à la plage du convertisseur.

6.2.2.3 Fréquence d'échantillonnage

Pour éviter le repliement spectral, un filtre passe-bas analogique doit être utilisé avant l'échantillonnage. Lorsque le filtre a une fonction de gain plate jusqu'à $f_{\max}$, la fréquence d'échantillonnage exigée est la suivante:

$$f_s > 2f_{\max} + f_{\text{trans}}$$

où f_{trans} est la largeur de bande de la fréquence de transition (voir la Figure 20), qui dépend:

- du type et de l'ordre du filtre analogique anti-repliement de spectre;
- de la fréquence de coupure du filtre;
- des caractéristiques du convertisseur analogique-numérique;
- du contenu éventuel en hautes fréquences du signal à mesurer;
- du niveau de bruit acceptable.

Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, les effets de repliement spectral introduisent une altération irréversible du signal échantillonné.

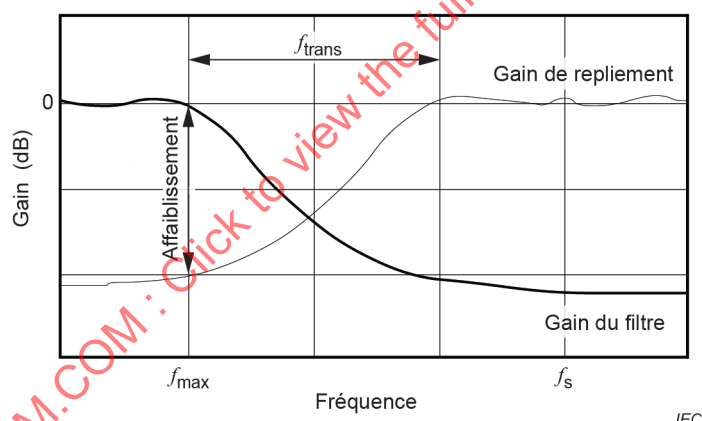


Figure 20 – Réponse en fréquence d'un filtre analogique anti-repliement de spectre

6.2.2.4 Durée d'enregistrement du signal et résolution en fréquence

Les définitions détaillées des grandeurs fluctuantes figurent en 3.4.11.

Il est important d'enregistrer et de stocker un enregistrement de signal suffisamment long en utilisant un nombre suffisant de fenêtres d'analyse pour une estimation répétable des caractéristiques spectrales du signal. La durée d'enregistrement du signal doit remplir au moins la condition $t_r/t_w \geq 5$ et, sauf convention contraire, ne doit pas être inférieure à 10 s, c'est-à-dire $t_r \geq 10$.

La résolution en fréquence Δf d'un spectre de puissance discret est liée à la fenêtre de temps d'analyse t_w par la relation suivante:

$$\Delta f = \frac{1}{t_w}$$

Dans la pratique, la durée de la fenêtre de temps doit satisfaire au moins à la condition $n \times t_w \geq 50$ pour obtenir une résolution en fréquence meilleure que 2 % de la fréquence de rotation.

Le chevauchement des fenêtres de temps pour l'estimation des spectres de fréquence ne doit pas être inférieur à 50 %.

6.2.2.5 Informations sur la phase

La relation de phase entre différentes grandeurs fluctuantes est importante dans certains cas. Dans de tels cas, les informations sur le déphasage doivent être traitées avec soin afin d'éviter d'éventuelles distorsions de phase causées par le système de traitement des données.

Lorsque les voies de mesure comportent différentes électroniques de conditionnement de signaux et que la phase est importante, cette influence doit être déterminée et corrigée.

Dans le cas où les voies sont échantillonnées séquentiellement, la distorsion de phase $\Delta\varphi$ pour la voie i ($i = 1, 2, \dots, n$) par rapport à la voie 0 dépend:

- du temps Δt entre l'échantillonnage des voies consécutives;
- de la position de la voie i ;
- de la fréquence d'intérêt f .

La distorsion de phase est:

$$\Delta\varphi = 2\pi \times \Delta t \times i \times f$$

où,

Δt peut être constant ou égal à $1/(n \times f_s)$.

6.2.2.6 Stockage des données

Les enregistreurs analogiques et les supports numériques peuvent être utilisés pour le stockage des données. Dans le premier cas, les signaux bruts sont par exemple enregistrés sur des bandes magnétiques et peuvent être récupérés pour être visualisés et analysés ultérieurement. L'enregistreur magnétique est considéré comme un élément du système d'acquisition et il convient que sa réponse en fréquence doit correspondre aux critères d'acquisition. Dans le second cas, les données numérisées sont stockées sur des supports de stockage de masse tels que des disques, des bandes, etc.

6.2.2.7 Procédure d'acquisition des données

Il convient que les informations suivantes soient disponibles afin d'identifier la procédure d'acquisition des données:

- résolution de la conversion analogique-numérique sous forme de nombre de bits;
- fréquence d'échantillonnage;
- réponse en fréquence des filtres anti-repliement de spectre;
- réponses en fréquence de la chaîne de mesure;
- nombre de fenêtres et nombre d'échantillons dans chaque fenêtre;
- procédure de stockage des données.

6.2.3 Traitement des données

Dès lors que les critères d'acquisition des données sont remplis, le traitement des données est effectué afin d'extraire les informations d'intérêt. Plusieurs transformations peuvent être appliquées aux signaux qui varient en fonction du temps afin d'analyser:

- a) leur comportement statistique;
- b) leur contenu spectral (dans le domaine fréquentiel);
- c) la corrélation ou d'autres relations entre les signaux.

Les paramètres d'analyse dans le domaine temporel sont (voir le 3.4.11):

- les valeurs moyennes;
- les valeurs caractéristiques crête à crête, les écarts-types, les valeurs efficaces;
- les fonctions de densité de probabilité, les distributions de probabilité;
- etc.

Il est recommandé d'utiliser généralement un niveau de confiance de 97 % pour garantir des résultats mutuellement comparables.

Les paramètres d'analyse dans le domaine fréquentiel sont les suivants:

- spectre d'amplitude (racine carrée du spectre de puissance automatique);
- spectre de puissance automatique (spectre d'énergie pour les signaux à énergie finie);
- interspectre;
- fonctions de transfert;
- fonctions de cohérence;
- etc.

6.3 Analyse des erreurs

6.3.1 Définitions

6.3.1.1 Définition de l'erreur

L'erreur de mesure d'une grandeur est la différence entre cette mesure et la valeur vraie de la grandeur.

Aucun mesurage d'une grandeur physique n'est exempt d'incertitudes qui résultent d'erreurs systématiques et aléatoires.

Les erreurs systématiques ne peuvent pas être réduites en répétant les mesurages car elles résultent des caractéristiques de l'appareillage de mesure, de l'installation et des conditions de fonctionnement. Toutefois, les erreurs aléatoires peuvent être réduites par la répétition des mesurages puisque l'erreur aléatoire de la moyenne de n mesurages indépendants est $\sqrt{n}$ fois plus petite que l'erreur aléatoire d'un mesurage individuel (voir l'Annexe H).

6.3.1.2 Définition de l'incertitude

La plage dans laquelle il est prévu que la valeur vraie d'une grandeur mesurée puisse se retrouver, avec une probabilité suffisamment élevée, est appelée l'incertitude de mesure. Pour les besoins du présent document, la probabilité à utiliser doit être un niveau de confiance de 95 %.

L'incertitude de mesure d'une grandeur X peut être exprimée en valeur absolue e_X ou en valeur relative: $f_X = e_X / X$.

6.3.1.3 Types d'erreurs

6.3.1.3.1 Généralités

Trois types d'erreurs doivent être pris en considération:

- les mesurages aberrants (voir le 6.3.1.3.2);
- les erreurs aléatoires (voir le 6.3.1.3.3);
- les erreurs systématiques (voir le 6.3.1.3.4).

6.3.1.3.2 Mesurages aberrants

Ce sont les erreurs humaines ou les erreurs dues à un mauvais fonctionnement des appareils de mesure et qui dénaturent un mesurage. Exemple: mauvaise transcription d'un résultat ou présence de poches d'air dans la conduite qui relie une tuyauterie d'eau à un manomètre. Il convient de ne pas prendre ces erreurs en compte dans une analyse statistique, et le mesurage correspondant doit être annulé. Lorsque l'erreur n'est pas suffisamment grande pour dénaturer visiblement le résultat, le point de données doit être répété ou certains critères de rejet peuvent être appliqués pour décider s'il convient d'admettre ou de rejeter les données correspondantes (voir la référence [15], par exemple).

6.3.1.3.3 Erreurs aléatoires et incertitude associée

Les erreurs aléatoires sont dues à des effets nombreux, infimes et indépendants qui empêchent un système de mesure de redonner la même lecture (répétabilité du système de mesure) pour une même valeur d'entrée de la grandeur à mesurer. Les résultats de mesure s'écartent de la moyenne selon les lois du hasard, de sorte que plus le nombre de données soumises au mesurage augmente, plus la distribution des résultats approche généralement d'une distribution normale (gaussienne).

L'erreur aléatoire dépend du soin apporté aux mesurages, du nombre de mesurages et des conditions de fonctionnement. La dispersion des lectures observée lors d'un essai résulte de la combinaison de l'erreur aléatoire due à l'instrumentation et de l'influence des conditions de fonctionnement. La répétition des points à une condition de fonctionnement donnée permet d'établir par des méthodes statistiques la valeur de l'incertitude associée aux erreurs aléatoires (voir le 6.3.2.3.1 et l'Annexe H).

Lorsque la taille de l'échantillon (c'est-à-dire le nombre de mesurages) est petite, il est nécessaire de corriger les résultats statistiques fondés sur l'hypothèse d'une distribution normale, au moyen de la valeur du coefficient t de Student, comme cela est précisé à l'Annexe H. Le coefficient t de Student est un coefficient qui compense le fait que, pour un niveau de confiance donné, l'incertitude sur l'écart-type augmente lorsque l'échantillon est de petite taille.

6.3.1.3.4 Erreurs systématiques et incertitude associée

Une erreur systématique est une erreur qui a invariablement la même ampleur et le même signe dans les mêmes conditions de mesure. Par conséquent, elle ne peut être réduite en augmentant le nombre de mesurages si l'équipement et les conditions de mesure restent inchangés.

Les erreurs systématiques n'affectent pas la répétabilité des mesurages au cours d'un essai.

L'incertitude associée aux erreurs systématiques ne peut être évaluée de façon expérimentale sans changer l'équipement ou les conditions de mesure. La seule façon de vérifier le système principal de mesure et d'obtenir un ordre de grandeur de l'erreur systématique est de mesurer chaque grandeur de base par deux systèmes différents, le cas échéant.

La seule autre possibilité est de porter un jugement subjectif fondé sur l'expérience et sur l'analyse du matériel employé.

Lorsque l'erreur a une valeur unique connue, il convient d'ajouter celle-ci au résultat du mesurage (ou en être soustraire); ainsi il n'y a plus d'erreur systématique dans le mesurage due à cette source.

Lorsque l'erreur systématique d'un appareil de mesure est inconnue mais que les limites de cette erreur (classe d'exactitude) sont spécifiées, l'intervalle entre ces limites peut être pris par hypothèse comme la plage d'incertitude due aux erreurs systématiques de cet appareil avec un niveau de confiance meilleure que 95 %.

Nonobstant la différence exposée ci-dessus entre erreurs systématiques et erreurs aléatoires, la probabilité de distribution des valeurs d'incertitude de chaque composante systématique est essentiellement gaussienne et la convention admise pour calculer l'incertitude totale due aux erreurs systématiques f_s à partir des erreurs systématiques individuelles est la combinaison quadratique.

6.3.1.4 Incertitude totale

L'incertitude totale d'un mesurage (f_t) est obtenue en combinant les incertitudes dues aux erreurs systématiques (f_s) et aléatoires (f_r) (voir les 6.3.1.3.4 et 6.3.1.3.3). Elle définit une plage à l'intérieur de laquelle la valeur vraie a par hypothèse une probabilité de 95 % de se trouver, et tout point de cette plage est également valable.

Comme les incertitudes dues aux erreurs systématiques et aléatoires ont, en fait, des lois de probabilité du même type, elles peuvent être combinées quadratiquement. Le Paragraphe 6.3.2.3.4 explique comment déterminer l'incertitude totale dans les essais sur modèle.

6.3.2 Détermination des incertitudes dans les essais sur modèle

6.3.2.1 Généralités

À partir des mesurages effectués sur le modèle, les différentes sources d'erreur doivent être examinées pour déterminer les incertitudes correspondantes.

Le Tableau 4 résume les principales sources d'erreurs qui peuvent survenir lors des essais sur modèle.

L'Article F.2 donne un exemple d'analyse des sources d'erreur et d'évaluation de l'incertitude lors du mesurage d'une grandeur par un dispositif électronique secondaire.

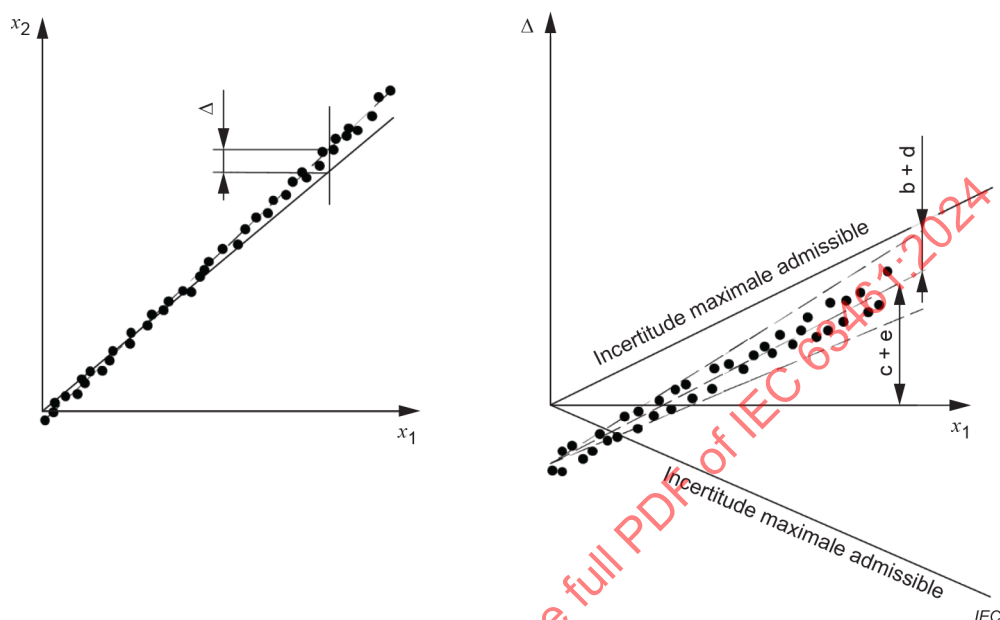
6.3.2.2 Sources d'erreurs

6.3.2.2.1 Erreurs survenant lors de l'étalonnage d'un instrument secondaire

Outre les éventuelles erreurs parasites qu'il convient d'éliminer, des erreurs systématiques et aléatoires peuvent se produire lors de l'étalonnage d'un instrument de mesure secondaire. Le biais⁴ de la méthode primaire et de l'instrument secondaire et les erreurs dans les propriétés physiques constituent des erreurs systématiques, tandis que la répétabilité de la méthode primaire et de l'instrument secondaire constituent des erreurs aléatoires; les erreurs dues aux phénomènes physiques et aux grandeurs d'influence peuvent être en partie systématiques et en partie aléatoires.

⁴ L'erreur due à un biais est la composante systématique de l'erreur d'un instrument de mesure.

L'incertitude totale dans l'étalonnage de l'instrument secondaire peut être calculée en combinant quadratiquement les composantes de l'erreur (voir le Tableau 4 et l'Article F.2), dans la mesure où chacune d'entre elles peut être évaluée. En pratique, un résultat d'étalonnage représenté par l'exemple de la Figure 21 peut être utilisé pour estimer la valeur des erreurs b) à e) du Tableau 4. L'élément f) est généralement négligeable; il convient que l'élément a) (biais de la méthode primaire) soit obtenu à un niveau supérieur de la chaîne d'étalonnage (traçabilité de la méthode primaire) ou certifié par une autorité neutre.



Légende

x_1 Valeurs données par la méthode primaire

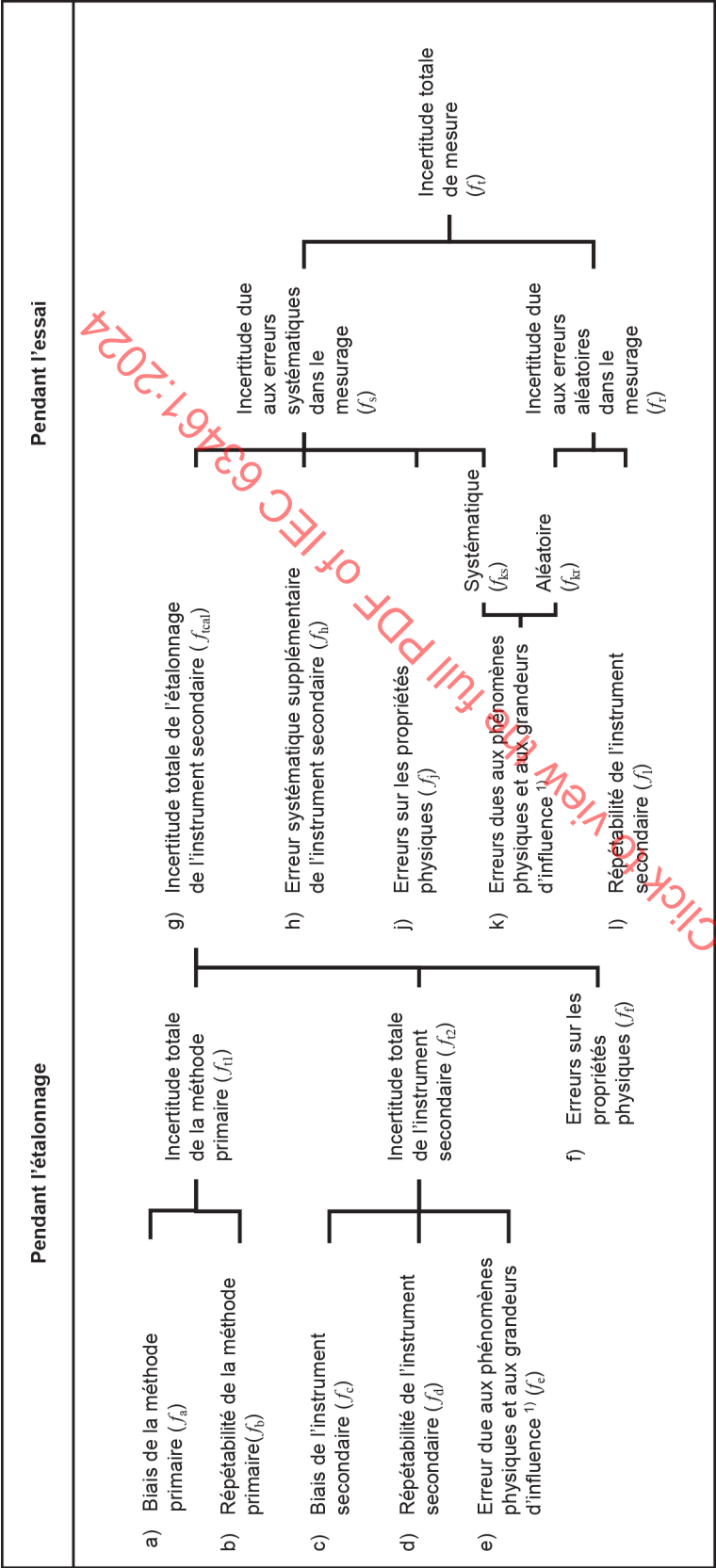
x_2 Lectures de l'instrument secondaire

• Points mesurés

Δ Différence entre la courbe d'étalonnage définie par x_1 et les points mesurés b), c), d) et e): voir le Tableau 10.

Figure 21 – Exemple de courbe d'étalonnage

Tableau 4 – Récapitulatif des erreurs qui déterminent l'incertitude totale de mesure



Les points a) à f) sont en référence croisée avec F.2.2.1; les points g) à l) sont en référence croisée avec F.2.3.1.

¹⁾ Grandeur d'influence: une grandeur qui n'est pas l'objet du mesurage mais qui affecte le résultat de mesure.

6.3.2.2.2 Erreurs survenant au cours des essais

Quelle que soit la nature de ses composantes individuelles, l'erreur totale dans l'étalonnage (point g)) décrite dans le Tableau 4 devient une erreur systématique dans la grandeur mesurée lorsque cet étalonnage est utilisé pour des essais sur modèle ultérieurs.

Les erreurs dues aux phénomènes physiques et aux grandeurs d'influence qui surviennent au cours des essais (point k) du Tableau 4) peuvent être ignorées lorsque les conditions de mesure (température ambiante, tension et fréquence de l'alimentation électrique, configuration d'écoulement, etc.) sont maintenues dans une plage raisonnable pendant l'étalonnage et les essais.

Puisque l'erreur de détermination des propriétés physiques (point j) du Tableau 4) est généralement faible, l'erreur systématique est largement contrôlée par le choix de la méthode d'étalonnage, les caractéristiques de l'appareillage de mesure, l'installation et les conditions de fonctionnement. Par exemple, la valeur de l'énergie cinétique calculée avec la vitesse débitante diffère de sa valeur vraie lorsque la distribution de la vitesse au niveau de la section de mesure n'est pas uniforme (voir le 8.2.2.4).

La répétabilité de l'instrument secondaire apparaît à nouveau pendant les essais (point l) du Tableau 4) et se traduit par une erreur aléatoire, qui peut être caractérisée selon 6.3.2.3.1.

6.3.2.3 Estimation de l'incertitude

6.3.2.3.1 Incertitude associée aux erreurs aléatoires

Il convient avant l'essai qu'un accord entre les parties précise la valeur maximale admissible de l'incertitude due aux erreurs aléatoires, f_r , pour chaque grandeur soumise à garantie. En l'absence d'un tel accord, il convient que la valeur maximale admissible de l'incertitude due aux erreurs aléatoires dans le rendement hydraulique proche de l'optimum soit $(f_m)_r = \pm 0,1 \%$.

La valeur réelle de l'incertitude due aux erreurs aléatoires doit être estimée pendant l'essai à certains points de fonctionnement dans une plage dans laquelle le modèle fonctionne dans des conditions stables (par exemple, dans la plage proche du point de rendement maximal). Les mesurages doivent être répétés un nombre suffisant de fois (par exemple, au moins cinq) pour chacun de ces points en vue d'appliquer la procédure décrite à l'Annexe H.

Lorsque, à ces points de contrôle, l'incertitude due aux erreurs aléatoires observée est inférieure aux valeurs précédemment convenues, les niveaux maximaux admissibles de l'incertitude sont considérés comme respectés dans toute la plage de fonctionnement garantie, même si l'évaluation directe de l'incertitude aux points de fonctionnement auxquels les conditions sont perturbées donne des valeurs supérieures à celle convenue. Dans des conditions de fonctionnement perturbées (par exemple, une turbine Francis qui fonctionne à charge partielle), la dispersion des mesurages peut être fortement accrue; ces valeurs plus élevées peuvent néanmoins être admises, car elles proviennent du modèle et non de l'instrumentation.

Lorsqu'aux points de contrôle, plus de 5 % des résultats se situent en dehors de la plage convenue, une analyse exacte des conditions de mesure doit être effectuée et les mesurages doivent être répétés ou une nouvelle valeur d'incertitude de la largeur de bande due aux erreurs aléatoires doit être convenue.

6.3.2.3.2 Incertitude associée aux erreurs systématiques

La première étape de l'estimation de cette incertitude consiste à identifier chaque composante susceptible d'influencer sa valeur. La deuxième étape consiste à attribuer des limites d'incertitude pour tenir compte de chacune de ces composantes. Cela peut être fait, en partie du moins, par une analyse statistique.

L'erreur systématique d'un mesurage dérive principalement de l'erreur systématique due à l'étalonnage de l'instrument secondaire, et des erreurs dans les propriétés physiques.

Les considérations suivantes sont utiles pour évaluer l'incertitude due aux erreurs systématiques (voir le Tableau 4 et l'Annexe F):

- a) Comme cela est expliqué en 6.3.2.2.2, presque toutes les sources d'erreurs systématiques sont couvertes par l'étalonnage de l'instrument secondaire. Dans la plupart des cas, l'incertitude due aux erreurs systématiques dans le mesurage d'une grandeur peut être considérée comme étant égale à l'incertitude totale dans l'étalonnage de l'instrument secondaire utilisé pour l'essai $f_s \cong f_{\text{tcal}}$, mais il faut garder à l'esprit que, dans certaines circonstances, d'autres sources d'erreur peuvent être prises en compte.
- b) Selon la méthode de mesure et l'instrument utilisés, l'incertitude due aux erreurs systématiques est constituée de certaines des composantes suivantes:
 - l'incertitude totale f_{t1} propre à la méthode primaire doit être déterminée avant l'étalonnage (voir le 6.3.2.2.1);
 - l'incertitude f_d due à l'erreur aléatoire de l'instrument secondaire lors d'un étalonnage et à la dispersion de plusieurs étalonnages effectués à différentes périodes lorsqu'aucune tendance systématique n'apparaît. Par exemple, lorsque le coefficient d'étalonnage utilisé pendant l'essai résulte de la moyenne de n étalonnages caractérisés par un écart-type s_c , cette composante de l'incertitude peut être considérée comme égale à:

$$f_d = \pm \frac{ts_c}{\sqrt{n}}$$

où t est le coefficient de Student pour $(n-1)$ degrés de liberté (voir le Tableau H.2);

- le biais de l'instrument secondaire et l'incertitude due à l'effet des phénomènes physiques et des grandeurs d'influence sont couverts par l'étalonnage, et l'incertitude résiduelle dans la correction appliquée peut généralement être omise;
 - les erreurs éventuelles sur les propriétés physiques sont faibles; par exemple, l'incertitude f_p dans la détermination de la masse volumique de l'eau est inférieure à $\pm 0,05 \%$;
 - une incertitude supplémentaire peut résulter du processus de régression utilisé pour déterminer la courbe d'étalonnage. Bien que cette incertitude puisse être évaluée conformément à l'ISO TR 7066 (toutes les parties), une valeur conventionnelle de $\pm 0,05 \%$ peut être retenue par hypothèse.
- c) L'incertitude f_s due à l'erreur systématique dans un mesurage peut alors être obtenue en combinant quadratiquement les incertitudes des composantes. Cette valeur s'applique lorsque les mesurages sont effectués dans des conditions normales par du personnel expérimenté à l'aide d'appareils de grande qualité, conformément aux dispositions du présent document, et peut être utilisée comme guide pour établir la valeur de l'incertitude due aux erreurs systématiques.

6.3.2.3.3 Incertitude d'une grandeur dérivée

Les parties concluent avant l'essai un accord qui doit spécifier la largeur de bande de la composante systématique de l'incertitude pour les différentes grandeurs, y compris le rendement hydraulique. Les valeurs réelles de l'incertitude due aux erreurs systématiques, comme celles qui résultent des erreurs aléatoires, dépendent de nombreux facteurs, dont certains ne peuvent être évalués qu'après l'achèvement de l'essai. Un examen de ces facteurs doit être effectué et un accord doit être établi pour déterminer si les incertitudes prévues doivent être modifiées pour des raisons techniques ou non.

L'incertitude (liée à des erreurs systématiques ou aléatoires) d'une grandeur dérivée est déterminée en combinant quadratiquement les incertitudes de mesure des composantes.

Par exemple, l'incertitude de calcul du rendement hydraulique $(f_{\eta_h})_s$ due à des erreurs systématiques est établie à partir des composantes d'erreurs systématiques individuelles de l'incertitude de mesure du débit $(f_Q)_s$, de l'énergie hydraulique massique $(f_E)_s$, du couple $(f_T)_s$, de la vitesse de rotation $(f_n)_s$ et de la masse volumique de l'eau $(f_\rho)_s$ ⁵ :

$$(f_{\eta_h})_s = \pm \sqrt{(f_Q)_s^2 + (f_E)_s^2 + (f_T)_s^2 + (f_n)_s^2 + (f_\rho)_s^2} \quad (\text{voir l'Annexe F})$$

Il est par convention admis, à des fins contractuelles, d'omettre l'incertitude associée à la formule de transposition du rendement hydraulique.

6.3.2.3.4 Incertitude totale

L'incertitude totale (voir le Tableau 4) d'une grandeur quelconque est donnée par:

$$f_t = \pm \sqrt{f_s^2 + f_r^2}$$

Lorsque la composante aléatoire de l'incertitude (évaluée selon les exigences de 6.3.2.3.1) est inférieure ou égale à la valeur maximale admissible (généralement $\pm 0,1 \%$), elle est par hypothèse et par convention égale à cette valeur, qui doit alors être utilisée pour calculer l'incertitude totale.

Lorsque, à certains points de fonctionnement, les conditions de mesure sont perturbées et que la dispersion des lectures (voir le 6.3.2.3.1) se traduit par une augmentation de l'incertitude due à des erreurs aléatoires observée, il est raisonnable de prendre en compte la valeur observée au lieu de la valeur précédemment convenue pour calculer l'incertitude totale.

7 Méthodes de mesure

7.1 Mesurage du débit

7.1.1 Généralités

Dans la mesure du possible, il convient qu'il n'y ait de perte ou de gain d'eau entre la machine et l'appareil de mesure du débit. Toutefois, lorsque de tels débits auxiliaires existent, ils doivent être mesurés indépendamment.

Les méthodes qui peuvent servir à mesurer le débit pendant un essai de réception sur modèle peuvent être classées en méthodes primaires et secondaires.

⁵ La composante systématique de l'incertitude de mesure de la masse volumique de l'eau $(f_\rho)_s$ peut généralement être ignorée.

7.1.2 Choix de la méthode de mesure

7.1.2.1 Méthodes primaires

Les méthodes primaires sont celles qui sont nécessaires pour le mesurage des grandeurs fondamentales: longueur, masse et temps. Dans le domaine d'application du présent document, les méthodes primaires qui peuvent être utilisées sont:

- la méthode par pesée (voir le 7.1.4.1);
- la méthode volumétrique (voir le 7.1.4.2).

Ces méthodes sont les plus exactes. Pour cette raison, et malgré certains inconvénients inhérents (encombrement du matériel, durée de mesure, etc.), toute installation d'essai sur modèle doit nécessairement permettre d'utiliser l'une de ces méthodes. Néanmoins, pour des raisons de commodité d'emploi, elle est généralement complétée par une méthode secondaire

7.1.2.2 Méthodes secondaires

De nombreuses autres méthodes (voir le 7.1.5), fondées sur différents principes et donc considérées comme des méthodes secondaires, peuvent être utilisées pour le mesurage du débit lors des essais sur modèle. Bien que certaines d'entre elles soient normalisées, la haute exactitude exigée pour les besoins du présent document rend obligatoire l'étalonnage de l'appareil de mesure *in situ* dans les conditions d'essai en vigueur par l'une des méthodes primaires susmentionnées. Par conséquent, et puisque la répétabilité est la qualité la plus importante exigée de l'appareil de mesure de la méthode secondaire, il n'est pas nécessaire qu'il satisfasse à toutes les exigences des normes applicables.

Les dispositions nécessaires pour effectuer périodiquement un tel étalonnage, sans démonter ou modifier la conduite de mesure, doivent être prévues au stade de la conception de l'installation d'essai.

Les principales méthodes secondaires de mesure du débit sont les suivantes:

- la méthode de vitesse-surface au moyen de moulinets ou de tubes de Pitot et les méthodes par traceur sont très rarement utilisées pour les essais sur modèle et ne sont pas mentionnées dans les paragraphes qui suivent;
- les déversoirs à plaques minces et les dispositifs de pression différentielle (diaphragmes, injecteurs et tubes de Venturi), même quand ils sont conçus, installés et utilisés conformément aux normes ISO applicables, n'atteignent pas l'exactitude exigée pour les essais sur modèle, lorsque des coefficients de débit normalisés sont utilisés; un étalonnage périodique *in situ* est donc obligatoire;
- plusieurs types de débitmètres, tels que les débitmètres à turbine, électromagnétiques, acoustiques ou à vortex; ils sont particulièrement pratiques à utiliser car ils permettent des mesurages rapides, leur signal de sortie peut facilement être introduit dans un système d'acquisition de données et la plupart d'entre eux génèrent peu de perturbations dans la configuration d'écoulement. Pour l'instant, l'effet des conditions d'installation sur la réponse de ces débitmètres n'est pas établi avec une exactitude suffisante pour les essais sur modèle. Par conséquent, leur étalonnage *in situ* est obligatoire et leur répétabilité sur toute la plage de conditions d'écoulement prévues doit être vérifiée régulièrement.

7.1.3 Exactitude des mesurages

7.1.3.1 Référence aux normes ISO

Une méthode de mesure n'est décrite en détail dans les paragraphes suivants que lorsqu'il n'existe pas de procédure normalisée ailleurs. Dans la mesure du possible, il est fait référence aux normes existantes, surtout à celles publiées par l'ISO, qui sont particulièrement adaptées aux exigences précises du présent document.

7.1.3.2 Évaluation de l'incertitude

Les valeurs numériques de l'incertitude de mesure indiquées dans les paragraphes suivants ne doivent être utilisées qu'à titre de recommandation. Elles ne sont valables que:

- dans les meilleures conditions de mesure;
- lorsque toutes les exigences spécifiées dans le présent document et dans les normes applicables sont satisfaites;
- lorsque les essais et les analyses sont effectués par un personnel qualifié et expérimenté.

Dans le cas où ces conditions ne sont pas remplies, il peut se produire une augmentation imprévisible des erreurs systématiques et aléatoires de mesure du débit.

Dans chaque cas particulier, l'utilisateur doit évaluer les valeurs réelles de l'incertitude due aux erreurs systématiques et aléatoires, en tenant compte de l'ensemble du système de mesure et des conditions de fonctionnement de l'installation d'essai.

La méthode qui permet de combiner les composantes d'erreur aléatoire et systématique pour calculer l'incertitude totale due aux sources individuelles d'erreur est expliquée en 6.3.2.3.4. Le résultat final est alors exprimé comme l'incertitude à un niveau de confiance d'environ 95 %.

7.1.3.3 Régularité de l'écoulement

Quelle que soit la méthode utilisée, un mesurage de débit pour un essai de réception sur modèle n'est valable que si l'écoulement est régulier ou presque régulier à chaque point.

Dans la plupart des cas, les méthodes primaires exigent une durée de mesure assez longue et ne produisent qu'une valeur moyenne du débit pendant cette durée. Il est donc possible de constater une variation du débit entre deux passages, mais pas les éventuelles fluctuations (voir le 8.5.3).

La plupart des méthodes secondaires citées en 7.1.2.2 produisent des lectures quasi instantanées dont il faut faire la moyenne pour obtenir la valeur moyenne du débit au niveau du point et qui peuvent être traitées graphiquement et statistiquement pour évaluer la nature et l'ampleur des fluctuations du débit (voir les 6.1 et 6.2). Il s'agit d'une autre raison pour laquelle il convient qu'une installation d'essai détienne d'une méthode primaire et d'une méthode secondaire.

7.1.4 Méthodes primaires

7.1.4.1 Méthode par pesée

7.1.4.1.1 Principe de la méthode

L'ISO 4185 énonce toutes les exigences nécessaires concernant l'appareillage de mesure, la procédure, la méthode de calcul du débit et les erreurs associées au mesurage.

Bien que l'ISO 4185 spécifie deux méthodes alternatives, la méthode "statique" et la méthode "dynamique", seule la méthode de pesée statique qui consiste à dériver le flux vers la cuve de pesée pendant une durée mesurée et à peser ensuite la quantité détournée, est recommandée aux fins du présent document.

La méthode par pesée, qui ne donne que la valeur moyenne du débit pendant le temps nécessaire pour recueillir une quantité d'eau appropriée, peut être considérée comme la méthode la plus exacte de mesure du débit.

Comme cela est indiqué dans l'ISO 4185, l'étalonnage du dispositif de pesage doit être vérifié périodiquement, au moins tous les deux ans pour les balances mécaniques et les capteurs de force. Cet intervalle peut être prolongé lorsque l'historique de l'étalonnage indique des résultats stables.

7.1.4.1.2 Incertitude de mesure

La méthode par pesée est affectée par des erreurs liées au pesage, au mesurage du temps de remplissage, à la détermination de la masse volumique, à la prise en compte de la température du fluide et au mouvement du partiteur. En outre, une correction de la flottabilité doit être apportée aux lectures de la bascule pour tenir compte de la différence entre la poussée exercée par l'atmosphère sur le liquide à peser et sur la masse de référence utilisée lors de l'étalonnage du dispositif de pesage.

Lorsque l'installation est construite, entretenue et utilisée avec soin, il convient d'obtenir une incertitude due aux erreurs systématiques sur le mesurage du débit (à un niveau de confiance de 95 %) comprise entre $\pm 0,1$ % et $\pm 0,2$ %.

7.1.4.2 Méthode volumétrique

7.1.4.2.1 Principe de la méthode

L'ISO 8316 énonce toutes les exigences nécessaires concernant l'appareillage de mesure, la procédure, la méthode de calcul du débit et les erreurs associées aux mesurages.

Bien que l'ISO 8316 spécifie deux méthodes alternatives, la méthode "statique" et la méthode "dynamique", le présent document recommande uniquement la méthode de jaugeage statique.

La méthode volumétrique a à peu près la même exactitude que la méthode par pesée et ne fournit que la valeur moyenne du débit pendant le temps nécessaire à la collecte d'une quantité d'eau appropriée.

Comme cela est indiqué dans l'ISO 8316, l'étalonnage du réservoir volumétrique doit être vérifié périodiquement, au moins tous les cinq ans pour les réservoirs en béton et tous les trois ans pour les réservoirs métalliques. Cet intervalle peut être prolongé lorsque l'historique de l'étalonnage indique des résultats stables.

7.1.4.2.2 Incertitude de mesure

La méthode volumétrique est affectée par des erreurs liées à l'étalonnage du réservoir, au mesurage des niveaux, au mesurage du temps de remplissage et au mouvement du partiteur. L'étanchéité du réservoir doit être vérifiée et une correction des fuites doit être appliquée si cela est nécessaire.

Lorsque l'installation est construite, entretenue et utilisée avec soin, une incertitude due aux erreurs systématiques sur le mesurage du débit (à un niveau de confiance de 95 %) comprise entre $\pm 0,1$ % et $\pm 0,2$ % peut être obtenue.

7.1.5 Méthodes secondaires

7.1.5.1 Exigences générales

Différents types de débitmètres peuvent être utilisés d'un commun accord dans les conditions suivantes:

- l'appareil choisi doit être de la meilleure qualité disponible, notamment en ce qui concerne sa répétabilité et sa sensibilité aux grandeurs d'influence (température ambiante, fréquence et tension de l'alimentation électrique, etc.);

- le débitmètre et le système de mesure associé doivent être étalonnés par une méthode primaire dans les conditions réelles de fonctionnement (voir les 5.3.2.4 et 7.1.5.7);
- la répétabilité du mesurage doit être vérifiée sur toute la plage de débits à mesurer.

Bien que leur application ne soit pas obligatoire, les normes pertinentes et les instructions du fabricant donnent des conseils utiles concernant les meilleures conditions d'installation et de mesure.

Les types de débitmètres les plus utilisés sont décrits de 7.1.5.2 à 7.1.5.6.

7.1.5.2 Dispositifs de pression différentielle

Des diaphragmes, des injecteurs ou des tubes de Venturi peuvent être utilisés pour mesurer le débit dans les installations d'essai sur modèle, surtout lorsqu'ils fonctionnent en circuit fermé sans surface d'eau libre.

Pour la conception du dispositif de pression différentielle, y compris ses prises de pression, son installation et ses conditions de fonctionnement, se reporter à l'ISO 5167-1; toutefois, les coefficients de débit normalisés ne permettent pas d'obtenir l'exactitude exigée dans le présent document (voir le 7.1.2.2). D'autres types de dispositifs de pression différentielle que ceux décrits dans l'ISO 5167-1 peuvent également être utilisés.

Les dispositifs de pression différentielle, en particulier les diaphragmes et les injecteurs, offrent une grande fiabilité, mais ils sont très sensibles à la configuration d'écoulement et provoquent une perte de pression élevée.

La pression différentielle générée par le dispositif doit être mesurée conformément au 7.2.4.

Les conduites de raccordement entre le dispositif primaire et le manomètre doivent être conformes à l'ISO 2186.

Il convient de veiller à éviter tout développement de cavitation.

7.1.5.3 Débitmètres à turbine

Les débitmètres à turbine, qui comprennent généralement un stabilisateur d'écoulement, exigent une longueur droite minimale en amont et en aval et ne génèrent qu'une très faible perturbation de l'écoulement, mais créent une perte de pression quelque peu élevée. Le signal de sortie, qui est une grandeur de fréquence, est simple à mesurer sans perte d'exactitude. Des précautions doivent être prises pour maintenir les paliers en bon état et les pales de la turbine propres. L'étalonnage doit être vérifié au moins après chaque maintenance.

Il doit l'être à la pression d'essai la plus basse (voir le 7.1.5.7) puisque la cavitation sur les pales de la roue peut se produire dans des conditions de basse pression.

7.1.5.4 Débitmètres électromagnétiques

Les débitmètres électromagnétiques font l'objet des normes ISO 20456:2017.

Les principaux avantages des débitmètres électromagnétiques sont qu'ils ne génèrent ni perturbation de l'écoulement ni perte de pression, et qu'ils sont peu sensibles à l'usure. Ils produisent une lecture instantanée du débit et sont donc particulièrement pratiques pour observer les fluctuations du débit. Des précautions doivent être prises pour détecter toute dérive dans la sortie du circuit électronique et dans l'état de surface des électrodes. L'étalonnage doit être vérifié au moins après chaque maintenance.

7.1.5.5 Débitmètres acoustiques

Il existe plusieurs méthodes de mesurage acoustique du débit. Les connaissances actuelles sont telles que la méthode préférentielle aux fins du présent document est celle qui repose sur le mesurage du temps de transit d'impulsions acoustiques se déplaçant vers l'amont ou vers l'aval, de préférence en empruntant plusieurs chemins parallèles.

Le système d'acquisition et de traitement des données doit démontrer que l'équipement fonctionne correctement (mesurage séparé de la vitesse moyenne d'écoulement le long de chaque trajet individuel, vérification de la vitesse du son, contrôle de la proportion des pertes d'impulsions, etc.).

Cette méthode est décrite avec plus de précisions dans l'IEC 60041:1991.

D'autres types de débitmètres acoustiques, fondés par exemple sur le mesurage de la réfraction d'un faisceau acoustique par la vitesse du fluide, ou sur la corrélation croisée de signaux acoustiques émis dans deux sections transversales, peuvent également être utilisés.

Les débitmètres acoustiques ont l'avantage de n'introduire aucune perturbation de l'écoulement ni perte de pression, mais ils sont quelque peu sensibles à la distribution de la vitesse d'écoulement et à la présence de bulles de gaz et de bruit acoustique. La sensibilité de ces débitmètres aux turbulences et l'échantillonnage limité des vitesses d'écoulement instantanées locales ne permettent pas d'utiliser des lectures successives pour évaluer le niveau des fluctuations du débit.

7.1.5.6 Débitmètres à vortex

Le principe des débitmètres à vortex repose sur le mesurage de la fréquence du décollement de tourbillon généré par un corps non profilé inséré dans l'écoulement, dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse débitante dans une plage donnée de nombres de Reynolds.

Bien que de nombreux appareils de ce type soient disponibles, l'expérience avec cette méthode de mesure du débit est encore limitée et la méthode ne doit être utilisée qu'avec prudence. Par exemple, toute vibration de la conduite est susceptible de modifier la fréquence mesurée et doit donc être évitée.

En raison du risque de cavitation sur le corps non profilé du débitmètre à vortex, l'étalonnage doit être vérifié à la pression d'essai la plus basse (voir le 7.1.5.7).

7.1.5.7 Procédure d'étalonnage

Comme cela est indiqué ci-dessus, tout appareil utilisé pour mesurer le débit par une méthode secondaire doit être étalonné par rapport à l'une des méthodes primaires décrites en 7.1.4. L'étalonnage doit être effectué sans démonter le débitmètre du circuit d'essai ni modifier les conditions d'écoulement à l'entrée du débitmètre.

L'étalonnage doit porter sur l'ensemble du débitmètre et du système de mesure associé: par exemple, un diaphragme, les conduites de raccordement, le transducteur de pression, son alimentation électrique et le système d'acquisition de données.

En principe, il convient d'effectuer l'étalonnage dans les conditions de fonctionnement réelles (pression, température, qualité de l'eau, etc.) qui prévalent pendant les essais. Lorsque la pression rencontrée au cours des essais est inférieure à la pression minimale pouvant être atteinte dans le circuit ouvert utilisé pour l'étalonnage, il doit alors être démontré que l'étalonnage du débitmètre n'est pas affecté par la cavitation à cette pression réduite. Une telle démonstration peut se faire en utilisant deux débitmètres secondaires en série, dont l'un n'est pas sensible aux effets de la cavitation. Il n'est pas admis d'effectuer un mesurage du débit avec un débitmètre affecté par la cavitation, même s'il est étalonné dans les mêmes conditions de fonctionnement, car les phénomènes en cause ne sont pas suffisamment reproductibles.

Tout étalonnage doit comprendre un nombre suffisant de points de mesure répartis uniformément sur toute la plage de débits à mesurer pendant les essais, afin de permettre une évaluation exacte de leur dispersion.

Dans la plupart des cas, le résultat d'un étalonnage peut s'écrire, au moins dans la plage d'utilisation, comme suit:

$$Q = CR^\alpha$$

où

- R est le signal de sortie fourni par le débitmètre secondaire;
- α est un exposant connu par des considérations théoriques ($\alpha = 1$ lorsque R est la fréquence d'un débitmètre à turbine, $\alpha = 1/2$ lorsque R est la pression différentielle d'un tube de Venturi, $\alpha = 3/2$ lorsque R est la hauteur de charge sur un déversoir rectangulaire, etc.);
- C est un coefficient de débit qui peut être constant ou variable sur la plage du compteur.

Il est ainsi possible de tracer le coefficient de débit en fonction du débit indiqué par la méthode primaire ou, de préférence, en fonction du coefficient non dimensionnel correspondant adapté au type de débitmètre (nombre de Reynolds pour les débitmètres en conduite fermée, nombre de Froude pour les déversoirs).

Dans tous les cas, il convient de déterminer par une technique de régression (la méthode des moindres carrés, par exemple) la courbe la mieux ajustée (souvent une ligne droite) qui passe par les points mesurés. La série ISO 7066 (voir également l'Annexe E) fournit des recommandations pour le calcul de cette courbe d'étalonnage et l'évaluation de l'incertitude associée.

Il convient en règle générale d'étalonner le débitmètre secondaire avant et après l'essai (voir le 5.3.1.6). Il peut être convenu que l'écart relatif $2(Q_1 - Q_2) / (Q_1 + Q_2)$ entre les deux étalonnages soit être inférieur à une valeur admissible spécifiée préalablement à l'essai (par exemple, 0,1 %), Q_1 et Q_2 étant les lectures du débitmètre secondaire fournies avant et après l'essai pour le même débit donné par la méthode primaire.

Lorsqu'une différence significative apparaît entre les deux étalonnages, le débitmètre et le système de mesure associé doivent être soigneusement inspectés pour établir la raison de cet écart et peuvent donc éventuellement rejeter l'essai. Il convient qu'un historique de l'étalonnage du débitmètre soit disponible à des fins d'inspection et d'analyse. En l'absence de tendances systématiques, la moyenne de toutes les valeurs obtenues peut constituer une meilleure approximation de la valeur vraie que la moyenne des deux valeurs obtenues avant et après l'essai.

7.2 Mesurage de la pression

7.2.1 Généralités

Le présent paragraphe ne traite que du mesurage de la valeur moyenne de la pression dans le temps. Les mesurages de pression dans les machines hydrauliques sont effectués afin de déterminer:

- a) les grandeurs des performances hydrauliques telles que l'énergie hydraulique massique E (voir les 8.2.2 et 8.2.3);

- b) les pressions manométriques ou différentielles à des endroits particuliers du passage de l'eau dans le modèle à différentes fins: par exemple pour mesurer le débit à l'aide de dispositifs de pression différentielle (voir le 7.1.5.2) ou pour obtenir des informations sur:
- la pression locale;
 - la distribution de la pression;
 - les essais indiciaires (valeurs à convertir en fonction des conditions du site).

La pression p est mesurée en tant que pression manométrique simple ou pression différentielle en régime permanent.

7.2.2 Choix de la section de mesure de la pression

Une attention particulière doit être accordée au choix de l'emplacement des sections de mesure; en principe, elles sont identiques aux sections de référence. Il convient que la perturbation de l'écoulement soit minimale. En règle générale, il convient que les sections de référence haute pression et basse pression 1 et 2, spécifiées dans le contrat, remplissent ces conditions. Toutefois, dans des circonstances exceptionnelles dans lesquelles la distribution des vitesses d'écoulement de la section de référence est considérablement dénaturée, il convient de remplacer cette section, si cela est possible, par d'autres sections de mesure aussi proches que possible de la section de référence et qui présentent de meilleures conditions d'écoulement.

Il convient que le plan de la section de mesure soit de préférence perpendiculaire à la direction moyenne de l'écoulement. Sa section transversale, exigée pour le calcul de la vitesse débitante de l'eau, doit être facilement mesurable.

Il convient que la section de mesure soit de préférence aménagée dans un tronçon de conduite rectiligne, mais elle peut être légèrement convergente ou divergente.

7.2.3 Prises de pression et conduites de raccordement

7.2.3.1 Nombre et emplacement des prises de pression

D'une manière générale, quelle que soit la forme de la section, au moins deux paires de prises de pression opposées doivent être utilisées (c'est-à-dire quatre prises de pression). Dans le cas des sections circulaires, les quatre prises de pression doivent être installées sur deux diamètres perpendiculaires. Il convient de ne pas placer les prises au point le plus élevé de la section de mesure ni à son voisinage, afin d'éviter les poches d'air, ni au point le plus bas ou à son voisinage, à cause du risque d'obstruction des prises par des dépôts solides.

Dans le cas des sections non circulaires (le plus souvent, des sections rectangulaires), il convient de ne pas placer les prises à proximité des angles. Lorsque des prises sont installées au plafond ou au radier d'une section, un soin spécial doit être apporté pour éviter des perturbations dues à l'air ou aux dépôts.

Lorsque les conditions d'écoulement sont perturbées ou asymétriques, plus de quatre prises de pression doivent être utilisées.

Les mesurages de la pression moyenne à chaque prise de pression de la même section de mesure ne doivent pas différer l'un de l'autre de plus de 0,5 % de l'énergie hydraulique massique de la machine pour un fonctionnement proche du point de rendement optimal.

Lorsque cette exigence n'est pas satisfaite, il convient de conclure un accord mutuel pour:

- choisir un autre emplacement; ou
- procéder à une évaluation de la distribution de l'énergie cinétique massique dans la section de mesure selon 8.2.2.4; ou

- accepter cet écart et ajouter arithmétiquement une incertitude supplémentaire à l'incertitude de mesure de l'énergie hydraulique massique E (voir les 8.2.2.5 et F.3.4).

7.2.3.2 Conception des prises de pression

Les prises de pression doivent être aménagées dans des bossages en matériau inoxydable. La Figure 22 représente des bossages typiques qui doivent être installés au ras de la paroi de la conduite.

L'alésage cylindrique de la prise de pression doit avoir un diamètre de 2 mm à 4 mm et une longueur minimale ℓ d'au moins deux fois le diamètre. Il doit être perpendiculaire à la paroi de la conduite et exempt de toute bavure ou irrégularité susceptible de provoquer des perturbations locales. Les bords des ouvertures doivent être nets ou arrondis avec un rayon de raccordement facile à la conduite $r \leq d/4$. La seule utilité de ce rayon est d'éliminer toutes bavures éventuelles.

La surface de la conduite doit être lisse et ne doit pas être courbée dans le sens de l'écoulement au voisinage de l'alésage sur au moins 100 mm en amont et en aval.

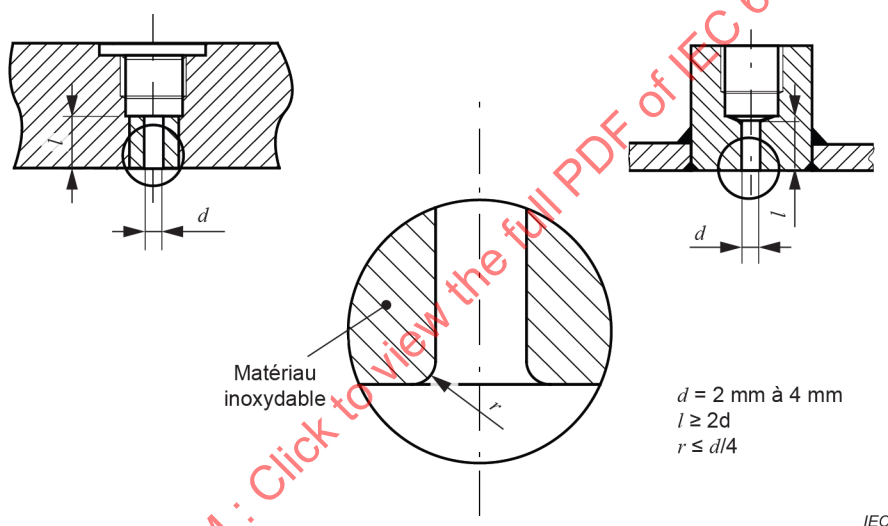
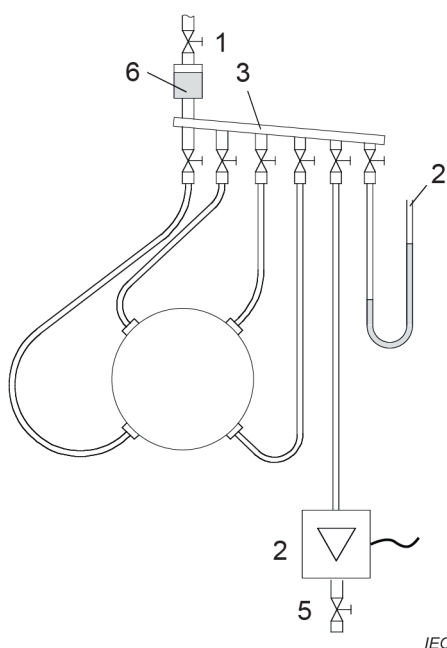


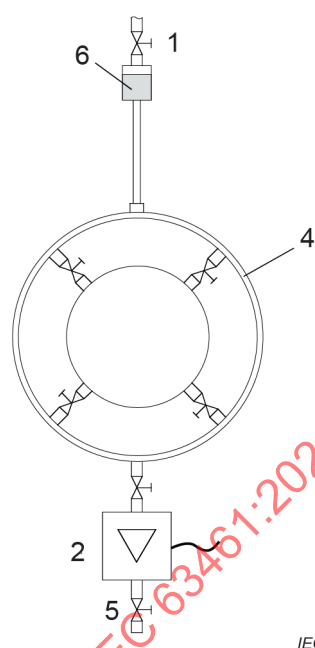
Figure 22 – Exemples de prises de pression

7.2.3.3 Conduites de pression

Les prises de pression peuvent être raccordées entre elles (Figure 23), mais chaque prise doit être équipée d'une vanne individuelle pour pouvoir être lue séparément. Le diamètre de la conduite de raccordement doit être au moins le double de celui de la prise et ne doit pas être inférieur à 6 mm. Le diamètre du collecteur (ou du collecteur annulaire, Figure 23b)) doit être au moins le triple de celui de la prise. Il convient que les conduites de raccordement aient, si cela est possible, la même longueur, et montent jusqu'au manomètre sans points hauts intermédiaires auxquels de l'air peut être emprisonné. Des vannes qui comportent une chambre pour échantillons de gaz doivent être prévues à tous les points hauts pour purger l'air. Il est recommandé d'utiliser des tuyaux en plastique transparent, disponibles pour une grande plage de pressions, car ils permettent de déceler la présence de bulles d'air. Toutefois, en cas de variations de pression, l'effet d'amortissement existant dans les tuyaux en plastique doit être pris en considération (voir le 7.2.3.4). Aucune fuite ne doit être admise dans les conduites de raccordement.



a) Collecteur de pression avec conduites de raccordement séparées du collecteur



b) Collecteur de pression avec collecteur annulaire

Légende

- 1 Événement
- 2 Appareil de mesure de la pression
- 3 Collecteur
- 4 Collecteur annulaire
- 5 Vidange
- 6 Enceinte pour échantillons de gaz

Figure 23 – Types de collecteurs de pression

7.2.3.4 Dispositifs d'amortissement

Dans la mesure du possible, tous les mesurages doivent être effectués en régime permanent et les fluctuations de pression doivent être éliminées à la source. En particulier, aucune fluctuation qui exige un dispositif d'amortissement pour le manomètre ne doit se produire dans la plage de fonctionnement normal.

Il n'est pas possible d'éviter les fluctuations dans certaines plages de fonctionnement (celle des faibles valeurs de Q , etc.). Un dispositif d'amortissement approprié peut être installé pour obtenir des lectures correctes sur un appareil de mesure de la pression dans de telles conditions, pourvu que le flux qui le traverse soit laminaire et de résistance égale dans les deux directions, assurant ainsi une résistance visqueuse linéaire. Ceci peut être obtenu par l'utilisation d'un tube capillaire avec un alésage d'environ 1 mm et une longueur convenable ou d'une vanne spécialement conçue à cet effet. Un dispositif d'amortissement peut également être obtenu en utilisant de longs tubes en plastique. Un amortissement supplémentaire peut être obtenu à l'aide d'un ballon pneumatique ou d'une chambre d'équilibre raccordée à la conduite de pression en amont du manomètre. L'utilisation d'un diaphragme n'est pas recommandée car elle peut introduire des erreurs dues à un amortissement non linéaire. Un circuit de contournement équipé d'une vanne doit être prévu autour de tout dispositif d'étranglement et gardé ouvert, sauf pendant la courte période à laquelle des lectures sont effectuées. Il n'est pas permis de couder ou de pincer les conduites de raccordement ni d'introduire un dispositif d'étranglement non symétrique (par exemple, une vanne).

7.2.4 Appareils de mesure de la pression

7.2.4.1 Types d'appareils

Les appareils de mesure de la pression se répartissent en deux catégories:

- les **méthodes primaires** (ou instruments primaires), par exemple les manomètres à colonne liquide (voir le 7.2.4.2.1), les manomètres à poids (voir le 7.2.4.2.2) et les balances à pression (voir le 7.2.4.2.3); ces méthodes n'utilisent que des mesurages de grandeurs fondamentales (longueur, masse) et ne nécessitent donc pas d'étalonnage;
- les **méthodes secondaires** (ou instruments secondaires), telles que les transducteurs de pression (voir le 7.2.4.3.1) et autres appareils tels que les manomètres à ressort (voir le 7.2.4.3.2), qui ont besoin d'être étalonnés par rapport à une méthode primaire utilisée comme étalon.

Le choix de l'appareillage de mesure doit tenir compte des exigences d'un système d'acquisition automatique de données. Une combinaison de méthodes primaires et secondaires est souvent appliquée.

Les principes physiques et les exemples typiques de montages expérimentaux possibles sont décrits pour plusieurs appareils dans les paragraphes suivants.

7.2.4.2 Méthodes primaires

7.2.4.2.1 Manomètres à colonne liquide

Les manomètres à colonne liquide sont utilisés pour mesurer de faibles pressions ou de petites pressions différentielles (jusqu'à environ 5×10^5 Pa, lorsque le mercure est utilisé comme liquide manométrique). Dans la plupart des cas, des manomètres à colonne d'eau ou de mercure sont utilisés (voir le Tableau 5). Dans certains cas, d'autres liquides de masse volumique connue peuvent être utilisés.

La pression mesurée avec un manomètre à colonne liquide est déterminée par la relation de base suivante:

$$p = \rho gh$$

où

h est la hauteur de la colonne de liquide;

ρ est la masse volumique du liquide utilisé dans le manomètre et prise pour la température de ce liquide.

Le tube d'un manomètre à colonne d'eau doit avoir un diamètre intérieur minimal de 12 mm dans la plage de mesure afin de réduire le plus possible les effets de la capillarité. Pour les manomètres à mercure, ce diamètre doit être d'au moins 8 mm.

Les types courants de manomètres à colonne liquide pour la pression manométrique ou la pression différentielle sont les suivants:

a) manomètre à un seul membre (tube vertical)

pot à mercure avec tube vertical (Tableau 5a)):

- Lorsque le manomètre est étalonné ou corrigé pour la variation du niveau h_1 dans le pot, il est nécessaire de lire uniquement la hauteur h_2 dans le membre unique;

colonne d'eau (tube vertical) (Tableau 5b)).

b) tube en U

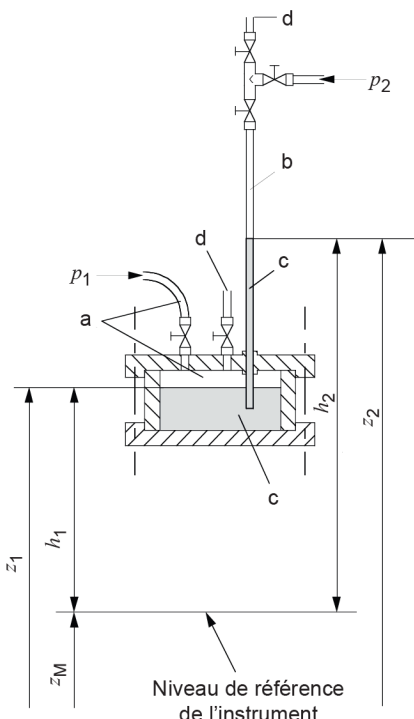
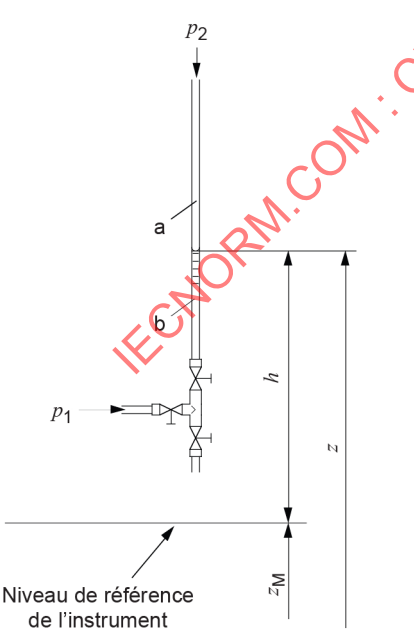
tube en U normal (Tableau 5c)):

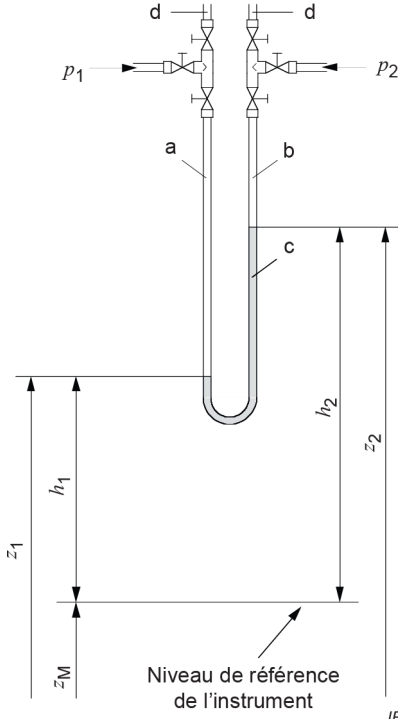
- Les hauteurs des colonnes de liquide dans les deux pieds doivent être relevées simultanément, ce qui peut être réalisé par lecture optique. Quelle que soit la combinaison de liquides utilisée, les masses volumiques correctes des deux liquides manométriques doivent être utilisées.

Il est rappelé qu'en raison des effets nocifs du mercure sur la santé humaine, le règlement local peut empêcher l'utilisation de cette méthode primaire.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63461:2024

Tableau 5 – Exemples de montage expérimental de manomètres à colonne liquide

Manomètre	Pression manométrique $p_2 = p_{\text{amb}}$	Pression différentielle $p_2 \neq p_{\text{amb}}$
	$p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	$\Delta p = p_1 - p_2$
a) Pot avec tube vertical  Niveau de référence de l'instrument IEC	$p_M =$ pression au niveau de référence de l'instrument $p_M = g [\rho_{\text{Hg}} (h_2 - h_1) + \rho_{\text{H}_1}]$ $h_1 = z_1 - z_M$ $h_2 = z_2 - z_M$ a = eau b = air c = mercure d = évent	$\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (h_2 - h_1)$ $\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (z_2 - z_1)$ a = eau b = eau c = mercure d = évent
b) Colonne d'eau (tube vertical)  Niveau de référence de l'instrument IEC	$p_M = \rho gh$ $h = z - z_M$ a = air b = eau	Non applicable

Manomètre	Pression manométrique $p_2 = p_{\text{amb}}$	Pression différentielle $p_2 \neq p_{\text{amb}}$
	$p = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$	$\Delta p = p_1 - p_2$
c) Tube en U  Les valeurs de ρ, ρ_{Hg} et ρ_a sont données à l'Annexe B.	$p_M = \text{pression au niveau de référence de l'instrument}$ $p_M = g [\rho_{\text{Hg}} (h_2 - h_1) + \rho_{\text{H}_1}]$ $h_1 = z_1 - z_M$ $h_2 = z_2 - z_M$ a = eau b = air c = mercure d = évent	$\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (h_2 - h_1)$ $\Delta p = g (\rho_{\text{Hg}} - \rho) (z_2 - z_1)$ a = eau b = eau c = mercure d = évent

7.2.4.2.2 Manomètres à poids

Les manomètres à poids (également appelés manomètres à piston) peuvent être de type simple ou différentiel. Leur plage d'application dépend de la surface utile du piston A_e et de la sensibilité du système de piston mécanique par rapport à la pression à mesurer. Pour les basses pressions ou les petites pressions différentielles, de grandes surfaces utiles A_e sont utilisées (par exemple, $A_e \approx 0,000\ 5\ \text{m}^2$ pour les pressions allant jusqu'à environ $3 \times 10^4\ \text{Pa}$) et inversement (par exemple, $A_e \approx 0,000\ 1\ \text{m}^2$ pour les pressions $> 2 \times 10^5\ \text{Pa}$).

Le diamètre effectif du piston d_e peut être déterminé comme étant moyenne arithmétique du diamètre d_p du piston et de celui d_b de l'alésage:

$$d_e = \frac{d_b + d_p}{2}$$

Cet appareil peut être utilisé pour le calcul de la pression sans étalonnage supplémentaire lorsque:

$$\frac{d_b - d_p}{d_b + d_p} \leq 0,001$$

La pression p mesurée à l'extrémité inférieure du piston d'un manomètre à poids chargé avec une masse m est:

$$p = \frac{mg}{A_e} = \frac{4mg}{\pi d_e^2}$$

Les manomètres à poids doivent satisfaire aux conditions principales suivantes:

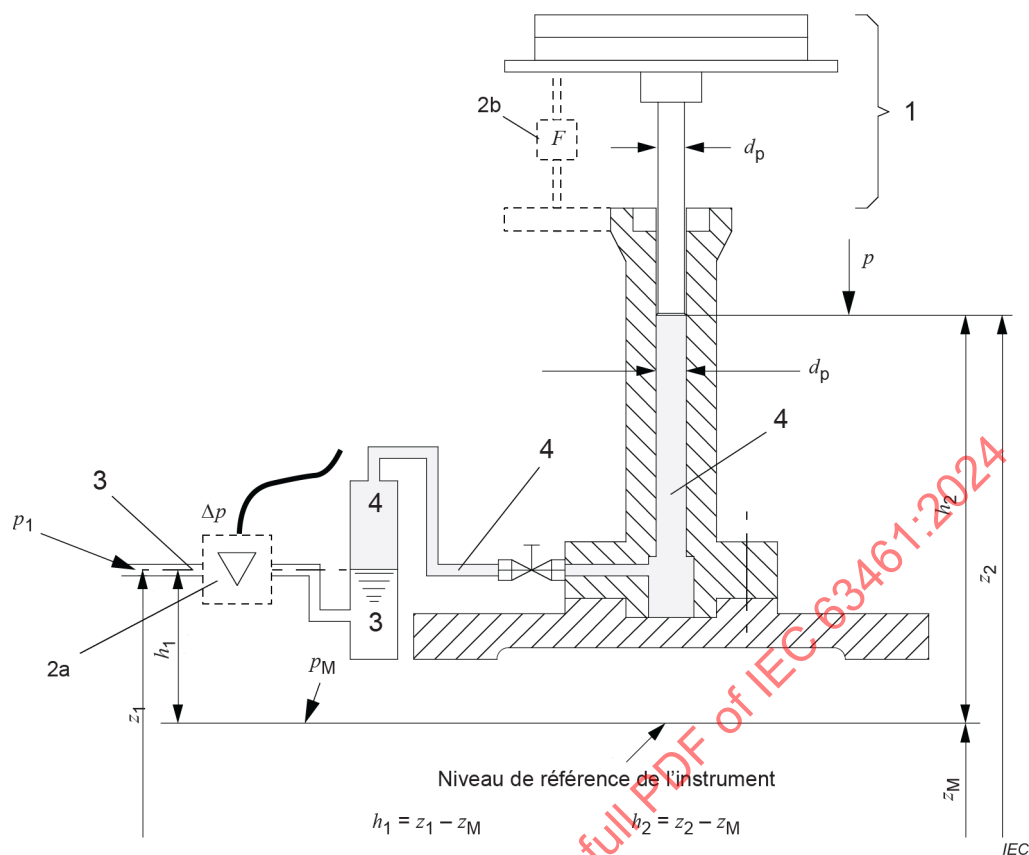
- le diamètre effectif d_e d'un piston doit être déterminé avec une incertitude relative $f_{de} < 5 \times 10^{-4}$;
- le frottement entre le piston et son alésage doit être éliminé au moyen d'une rotation lente du piston ($0,25 \text{ s}^{-1} \leq n \leq 2 \text{ s}^{-1}$), et le cylindre doit être rempli d'un fluide convenable, généralement de l'huile de faible viscosité ($\approx 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$);
- l'axe du piston doit être vertical. Toutes les masses agissantes (poids, piston, plateau à poids, etc.) doivent être étalonnées.

Lorsqu'un système d'acquisition de données est employé, il est recommandé d'utiliser un montage combinant un manomètre à poids et un transducteur de pression ou de force (voir la Figure 24).

La courbe de correction de ces montages doit être établie soit par comparaison avec un manomètre à poids étalonné, sans compensation, soit en ajoutant à pression constante sur le plateau à poids de petits poids de masse appropriée étalonnée, afin que le compensateur indique le zéro.

Les manomètres à poids du type ci-dessus reliés à des transducteurs ou à des capteurs de force sont utilisés de préférence pour l'acquisition automatique de données.

La sensibilité d'un manomètre à poids travaillant dans de bonnes conditions est inférieure à 0,002 kg, c'est-à-dire inférieure à $(0,02 / A_e)$ Pa (par exemple, $A_e = 0,000 2 \text{ m}^2$, sensibilité: 100 Pa).



Légende

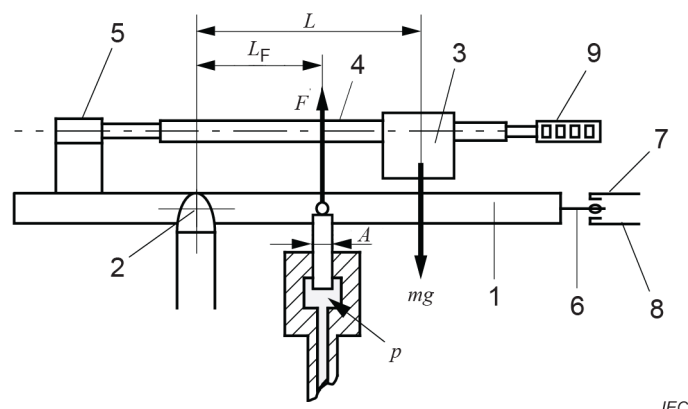
- 1 Masse agissante
- 2a Transducteur de pression différentielle
- 2b Transducteur de force
- 3 Eau
- 4 Huile

Cas	Méthode	Équation
2a	Compensation par transducteur de pression différentielle	$p_M = p_1 + \rho g h_1 = p + \rho_{\text{oil}} g (h_2 - h_1) + \rho g h_1 + \Delta p$
2b	Compensation par transducteur de force	$p_M = p_1 + \rho g h_1 = p + \rho_{\text{oil}} g (h_2 - h_1) + \rho g h_1 + (4F) / (\pi d_e^2)$

Figure 24 – Manomètre à poids avec compensation par transducteur de pression ou de force (exemple de montage expérimental)

7.2.4.2.3 Balance à pression

Une extension du manomètre à poids est la balance à pression qui comprend une balance montée sur des pivots sans frottement et reposant sur un ou plusieurs manomètres à poids ou un manomètre à poids de type différentiel. La force exercée par le piston du manomètre à poids est équilibrée par un poids curseur qui se déplace le long de la balance (Figure 25). Le fonctionnement de la balance et du poids curseur peut être manuel ou être assuré par un système d'équilibrage automatique. La balance à pression est en principe une méthode primaire, mais il est nécessaire de l'étalonner dans certains cas.



IEC

Légende

- 1 Balance
- 2 Pivot sans frottement
- 3 Poids curseur (masse m)
- 4 Vis calibrée
- 5 Servomoteur
- 6, 7 et 8 Contacts électriques
- 9 Compteur des tours à déterminer L

$$p = (mgL) / (AL_F)$$

A Section transversale du piston

p Pressure à mesurer

$F = pA$ = Force exercée sur la balance

Figure 25 – Balance à pression (exemple de montage expérimental)

7.2.4.3 Méthodes secondaires

7.2.4.3.1 Transducteurs de pression

Les transducteurs de pression sont des dispositifs électromécaniques dans lesquels les effets mécaniques produits par la pression sont convertis en signaux électriques.

Bien que les transducteurs de pression soient également utilisés pour mesurer les fluctuations de pression, le présent paragraphe ne traite que des mesurages de pression statique en régime permanent, afin d'obtenir la valeur moyenne.

La plage appropriée pour le transducteur de pression doit être choisie en fonction de la pression à mesurer.

Quelques-uns des avantages liés à l'utilisation de transducteurs de pression sont les suivants:

- il est facile de les intégrer à un système électronique d'acquisition de données;
- ils n'exigent en général que des débits négligeables à travers les prises de pression, fournissant ainsi une réponse rapide et exacte;
- les valeurs moyennes de pression ou de pression différentielle fluctuante, ainsi que des enregistrements de phénomènes transitoires sont faciles à obtenir à l'aide d'un équipement électronique courant.

Il convient que les transducteurs de pression présentent les caractéristiques suivantes:

- stabilité suffisante de l'étalonnage;
- grande reproductibilité, hystérésis négligeable;

- faible dérive du zéro et faible sensibilité à la température;
- aucune influence de l'effet dû au biais lorsqu'ils sont chargés par la pression.

Il convient d'effectuer des mesurages avec et sans filtres sur l'équipement électronique pour assurer l'absence de biais quand les filtres sont en service.

La chaîne complète du transducteur de pression doit être étalonnée dans les conditions de pression d'essai. L'exactitude d'un transducteur est surtout déterminée par l'exactitude de l'étalonnage. Celui-ci doit être effectué au moyen d'une méthode primaire, par exemple un manomètre à poids, qui permet de vérifier les mesurages effectués par la chaîne du transducteur à tout moment pendant les essais.

Pour réduire l'erreur systématique, il est également recommandé d'installer deux chaînes semblables de transducteurs en parallèle, et de prendre des lectures simultanées durant l'essai. Les transducteurs et leurs chaînes de transducteurs doivent être contrôlés avant et après les essais, et quand les deux chaînes donnent des lectures qui diffèrent plus que leur incertitude en raison d'erreurs systématiques, une comparaison avec une méthode primaire doit être effectuée.

7.2.4.3.2 Autres appareils: le manomètre à ressort

Ce type de manomètre utilise la déflexion mécanique d'un tube (en boucle simple ou spirale) ou d'une membrane pour indiquer la pression. La plage d'un tel manomètre doit être choisie en fonction de la pression à mesurer. Ce manomètre peut être utilisé d'un commun accord entre les parties, pour autant que l'appareil soit d'une exactitude suffisante, soit utilisé dans sa plage de mesure optimale (normalement entre 60 % et 100 % de la graduation) et soit convenablement étalonné par rapport à une méthode primaire avant et après l'essai.

7.2.5 Étalonnage de l'appareillage de mesure de la pression

7.2.5.1 Procédure générale d'étalonnage

Comme cela est indiqué précédemment, la pression mesurée à l'aide de méthodes secondaires (transducteurs ou manomètres à ressort) doit être vérifiée ou étalonnée. Cela peut se faire par comparaison avec les méthodes primaires (voir les 7.2.4.2.1 et 7.2.4.2.2) ou par comparaison avec la pression statique obtenue par un niveau d'eau libre comme cela est décrit en 7.2.5.3, ou par un dispositif de commande/appareil d'étalonnage de pression de haute précision (voir le 7.2.5.2) ou avec un étalon autorisé.

Il peut également être utile de vérifier l'influence du système de mesure et d'acquisition de données au moyen d'un étalonnage dynamique, en utilisant un générateur de fluctuation de pression de fréquence variable et de valeur moyenne connue, afin d'assurer qu'aucun biais n'affecte la valeur moyenne du mesurage de la pression statique.

7.2.5.2 Dispositif de commande/appareil d'étalonnage de pression de haute précision

Lorsqu'un dispositif de commande de pression de haute précision est utilisé pour l'étalonnage, les conditions suivantes doivent être remplies:

- Un certificat d'étalonnage, datant de moins de 12 mois, délivré par un institut accrédité peut être présenté. La validité du certificat peut être prolongée de 12 mois supplémentaires lorsque l'étalonnage est vérifié à l'aide d'une méthode primaire;
- L'incertitude de la méthode d'étalonnage est d'au moins 0,025 % de la valeur mesurée, mais ne doit pas être inférieure à la résolution spécifiée du dispositif de commande/de l'appareil d'étalonnage de pression.

7.2.5.3 Comparaison des pressions manométriques avec une pression statique bien définie obtenue à partir d'un niveau d'eau libre

Avant et après l'essai de réception et, si cela est nécessaire, au cours de l'essai, les lectures du manomètre p_M peuvent être comparées à la pression statique pour un débit nul, obtenue à partir d'un niveau d'eau libre en tenant compte de la flottabilité de l'eau dans l'air:

$$p = (\rho - \rho_a) g \Delta z$$

7.2.6 Mesurages de vide

7.2.6.1 Exigences générales

Les paragraphes 7.2.2 à 7.2.4 s'appliquent également pour les mesurages de vide, sauf dans les cas indiqués en 7.2.6.2.

7.2.6.2 Conduites de raccordement pour les mesurages de vide

Les conduites de raccordement doivent être entièrement remplies d'eau ou, lorsque de l'air est utilisé, doivent être transparentes pour permettre d'observer le niveau de l'eau, le cas échéant. De telles conduites, quand elles sont remplies d'eau, doivent être purgées soigneusement et fréquemment entre les mesurages, afin d'éliminer les dégagements d'air dissous, ou l'air entrant par la prise de pression, et pour maintenir l'eau dans les conduites de pression à la même température que dans la conduite. Toutes les conduites et connexions doivent être étanches à l'air (exempts de fuites). Les tuyaux souples ne peuvent être utilisés comme conduites de pression que s'ils sont suffisamment rigides pour ne pas être déformés ou affaiblis par la pression ambiante. Les tuyaux en plastique transparent sont très pratiques pour observer les bulles d'air, s'il y en a.

7.2.7 Incertitude de mesure de la pression

Estimations des incertitudes absolues e_p (à un niveau de confiance de 95 %) dues aux erreurs systématiques qui peuvent se produire:

- manomètres à colonne liquide mercure/eau:
 $\pm 50 \text{ Pa}$ à $\pm 300 \text{ Pa}$
- manomètres à eau liquide/air:
 $\pm 10 \text{ Pa}$ à $\pm 50 \text{ Pa}$
- manomètres à poids:
 $\pm 1 \times 10^{-3} p$ à $\pm 3 \times 10^{-3} p$
- balances à pression:
 $\pm 2 \times 10^{-3} p$ à $\pm 5 \times 10^{-3} p$
- manomètres à ressort:
 $\pm 3 \times 10^{-3} p_{\max}$ à $\pm 10 \times 10^{-3} p_{\max}$ (où $p_{\max}$ est la lecture à pleine échelle de l'instrument)
- transducteurs de pression:
 $\pm 1 \times 10^{-3} p_{\max}$ à $\pm 5 \times 10^{-3} p_{\max}$ (où $p_{\max}$ est la lecture à pleine échelle de l'instrument).

Ces valeurs sont valables pour les conditions de pression stables. Il convient de noter que les fluctuations de pression du côté haute pression de la pompe peuvent être importantes et plus ou moins asymétriques, de sorte que lorsqu'elles ne sont pas correctement amorties (voir le 7.2.3.4), les incertitudes peuvent être accrues.

7.3 Mesurage du niveau d'eau libre (voir aussi l'ISO 4373)

7.3.1 Généralités

En général, il convient de fonder la détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine modèle sur le mesurage de la pression dans les passages d'eau conformément à 8.2.1.2.

Toutefois, dans les bancs d'essai dans lesquels les niveaux d'eau sont libres et stables, l'énergie hydraulique massique peut être déterminée sur la base des mesurages des niveaux d'eau libres (voir le 8.2.3.2).

Le mesurage des niveaux d'eau libre est également nécessaire pour certaines méthodes de mesure du débit (voir, par exemple, 7.1.4.2).

7.3.2 Choix des sections de mesure du niveau d'eau

La section de mesure destinée à la détermination d'un niveau d'eau libre doit être choisie de manière à satisfaire aux exigences suivantes:

- a) lorsqu'aucune exigence particulière de similitude n'est imposée, le modèle doit être disposé de manière que l'écoulement soit régulier et sans perturbations. En particulier, les surfaces d'eau libre au niveau des sections de mesure doivent être stables. Il convient donc de prévoir une submersion suffisante;
- b) l'aire utilisée pour déterminer la vitesse d'écoulement moyenne de l'eau doit être définie avec exactitude et être facilement mesurable.

7.3.3 Nombre de points de mesure dans une section de mesure

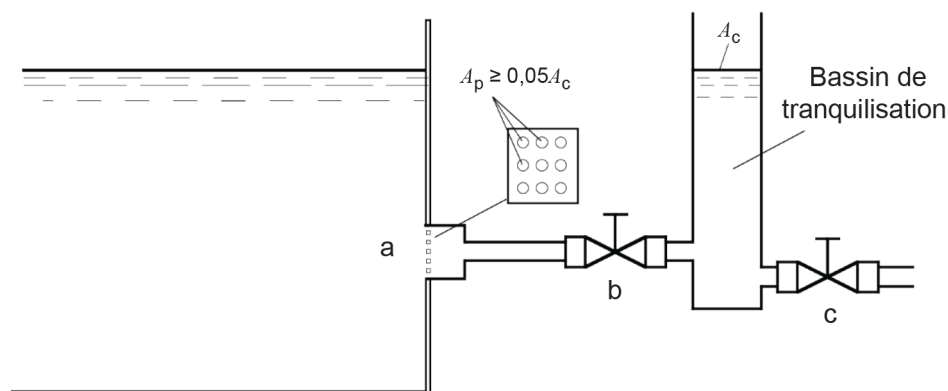
Les niveaux d'eau libre doivent être mesurés si possible pour au moins deux points dans chaque section de mesure ou dans chaque pertuis d'une section de mesure ramifiée, et la moyenne des lectures doit être prise comme le niveau libre de l'eau.

7.3.4 Méthodes de mesure

7.3.4.1 Généralités

En général, le niveau d'eau libre est mesuré à partir d'un niveau de référence z_M de l'instrument, déterminé au moyen d'un instrument de haute précision par rapport à d'autres niveaux de référence.

Le niveau d'eau libre n'est généralement pas mesuré directement dans la section, mais dans un bassin de tranquillisation relié à la section de mesure, comme le représente la Figure 26.



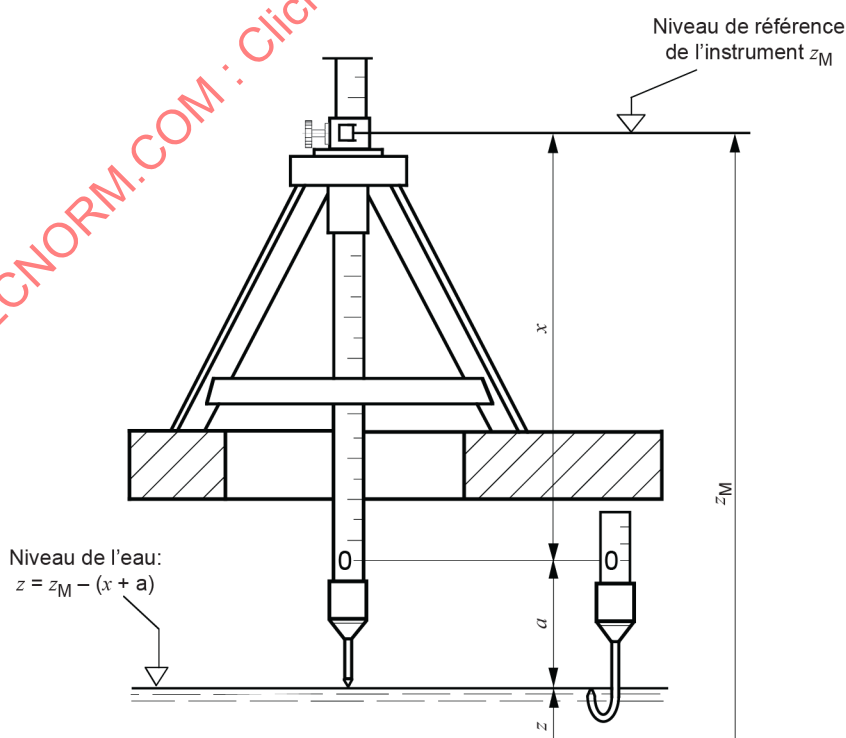
IEC

Légende

- a Tôle perforée, au ras de la paroi
- b Vanne de déconnexion
- c Vanne de purge
- A_p Section transversale totale de la perforation
- A_c Section transversale du bassin

Figure 26 – Bassin de tranquillisation**7.3.4.2 Limnimètre à pointe ou à crochet**

Les limnimètres à pointe ou à crochet (Figure 27) peuvent être utilisés pour déterminer le niveau d'une eau calme, de préférence dans des bassins de tranquillisation ou directement dans l'écoulement lorsque le niveau d'eau libre est particulièrement peu perturbé. Au lieu de l'indication visuelle normale du contact avec l'eau, des indicateurs électriques, optiques ou autres peuvent être utilisés, à condition qu'ils soient étalonnés par rapport à la méthode visuelle directe.



IEC

Figure 27 – Limnimètres à pointe et à crochet

7.3.4.3 Limnimètre à flotteur

Les limnimètres à flotteur peuvent être utilisés lorsque le niveau d'eau varie fortement. Le diamètre du flotteur doit être d'au moins 150 mm. La dimension minimale d'un bassin de tranquillisation doit être de 200 mm. L'appareil doit être sensible à un déplacement manuel de 1 mm près par rapport à la lecture correcte (résolution de $\pm 0,001$ m).

7.3.4.4 Appareil de mesure de la pression

Des transducteurs de pression immergés ou tout autre appareil de mesure de la pression, y compris des manomètres à colonne liquide (tube vertical) peuvent être utilisés (voir le 7.2) pour déterminer le niveau d'eau libre. L'indication de la pression doit être vérifiée en eau morte.

7.3.4.5 Barboteur à air comprimé

Le niveau d'eau libre peut également être déterminé au moyen de la pression à l'intérieur d'un tube rempli d'air comprimé, la technique dite du "barboteur" de purge de gaz (pour des informations détaillées, voir l'IEC 60041:1991).

7.3.4.6 Autres méthodes

D'autres méthodes peuvent être utilisées, par exemple les appareils à ultrasons et les méthodes capacitatives, pour autant qu'elles satisfassent à l'exactitude exigée (voir le 7.3.5).

7.3.5 Incertitude de mesure du niveau d'eau libre

Estimations des incertitudes absolues e_z (à un niveau de confiance de 95 %) dues aux erreurs systématiques qui peuvent se produire dans le cas d'une eau calme et d'une vitesse inférieure ou égale à 1,0 m/s (la valeur la plus faible se rapportant à une vitesse proche de zéro):

- limnimètres à pointe ou à crochet:
 $\pm 0,001$ m à $\pm 0,003$ m
- limnimètres à flotteur:
 $\pm 0,001$ m à $\pm 0,003$ m
- transducteurs de pression immergés:
 $\pm 0,5 \times 10^{-3} z_{\max}$ à $5 \times 10^{-3} z_{\max}$ (où $z_{\max}$ est la lecture à pleine échelle de l'instrument)
- barboteur à air comprimé:
 $\pm 0,001$ m à $\pm 0,003$ m
- appareil à ultrasons:
 $\pm 0,002$ m à $\pm 0,010$ m

Dans le cas d'un écoulement très turbulent et de $v > 1,0$ m/s, par exemple près de la sortie d'un aspirateur de la turbine, les incertitudes peuvent être considérablement plus élevées.

7.4 Mesurage du couple de l'arbre

7.4.1 Généralités

Le calcul de la puissance mécanique de la roue P_m exige la détermination du couple appliqué à la roue T_m :

$$P_m = 2\pi n T_m$$

où

$$T_m = T + T_{Lm}$$

T_{Lm} est le couple de frottement dû à la disposition des joints et des paliers.

En principe, le couple peut être mesuré par deux différents systèmes de mesure:

- a) ceux du type "cadre oscillant", où T_{Lm} est un "couple intérieur", c'est-à-dire que T_{Lm} est pris en compte par le système lui-même (décrit ci-après comme "palier de parties tournantes en équilibre", voir par exemple la Figure 28 et la Figure 29).
- b) ceux pour lesquels T et T_{Lm} sont mesurés séparément (décrits ci-après comme "palier de parties tournantes en déséquilibre", voir par exemple la Figure 30).

Le couple de l'arbre T de la roue peut être absorbé ou généré par:

- une machine électrique, généralement un moteur/générateur à vitesse variable,

ou absorbé par différents types de freins:

- frein à courants de Foucault,
- frein hydraulique,
- frein mécanique.

7.4.2 Méthodes de mesure du couple

7.4.2.1 Méthode primaire

Dans la méthode primaire, le couple T est déterminé par la force F appliquée à un bras de levier multipliée par le rayon r auquel elle est appliquée:

$$T = F \times r$$

La force réelle appliquée pour équilibrer le cadre oscillant peut être mesurée:

- a) en pesant des masses sur un système de levier (poids étalonnés et bras de levier étalonné). Il s'agit en principe de la méthode primaire de base;
- b) par l'une des méthodes suivantes, qui peut être étalonnée *in situ* par la méthode primaire de base ci-dessus:
 - transducteur de force,
 - manomètre (par l'intermédiaire d'un piston rotatif),
 - balance mécanique.

Pour augmenter l'exactitude du calcul de la force totale, il est recommandé de contrebalancer une partie de la force qui agit sur le bras au moyen de poids étalonnés.

7.4.2.2 Méthode secondaire

Un couplemètre peut être utilisé à condition que son exactitude soit acceptable par toutes les parties et qu'il soit étalonné par la méthode primaire. Un couplemètre comprend une longueur d'arbre dont la contrainte de torsion, lorsqu'il tourne, est convertie en une grandeur de sortie électrique par des moyens optiques, électriques ou autres. La conception et la disposition de ce type de couplemètre doivent être telles que le mesurage ne soit pas influencé par la vitesse, la température, la poussée axiale ou radiale.

7.4.3 Méthodes d'absorption/génération de puissance

7.4.3.1 Moteur/générateur à vitesse variable

Cette méthode comprend une machine qui permet d'absorber et de générer de l'énergie électrique, montée de manière appropriée pour que le couple mécanique puisse être mesuré. Cet appareil peut être utilisé à la fois pour les modèles de turbine et de pompe.

7.4.3.2 Frein à courants de Foucault

Le fonctionnement de ce frein électromagnétique est limité à l'absorption de puissance.

7.4.3.3 Frein hydraulique

Ce frein absorbe la puissance de manière hydrodynamique. Il n'est pas adapté aux faibles vitesses car sa puissance d'absorption varie avec n^3 .

7.4.3.4 Frein mécanique

Ce frein absorbe la puissance par frottement. Il présente l'avantage de pouvoir appliquer des couples élevés à des vitesses faibles, même jusqu'à une vitesse de rotation nulle. Le couple appliqué doit être constant et le système mécanique doit être exempt de vibrations.

7.4.4 Disposition du montage

7.4.4.1 Généralités

Les figures de la Figure 28 à la Figure 33 représentent des montages pratiques qui comprennent des méthodes primaires et secondaires de mesure du couple. Tous les montages représentés peuvent être adaptés à un banc d'essai à axe horizontal ou à axe vertical.

La Figure 28 et la Figure 29 représentent le principe du montage en équilibre. Le couple agissant sur la roue est mesuré au niveau du bras de couple du cadre oscillant.

Lorsque le cadre oscillant, représenté à la Figure 29, est constitué de deux cadres distincts, les couples qui agissent sur chaque cadre doivent être mesurés et additionnés algébriquement.

La Figure 30 représente un montage qui n'est pas totalement équilibré, les pertes dues au palier et au joint doivent donc être mesurées séparément.

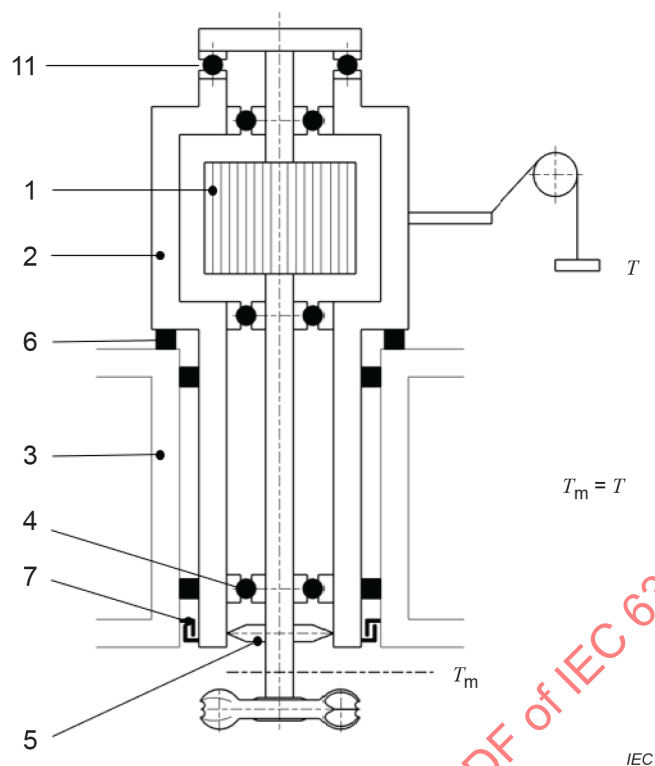
La Figure 31 représente un montage qui utilise un couplemètre.

La Figure 32 et la Figure 33 représentent des variantes avec un palier-guide supplémentaire qui peut être équilibré ou non.

La nomenclature pour la Figure 28 à la Figure 33 est donnée dans le Tableau 6.

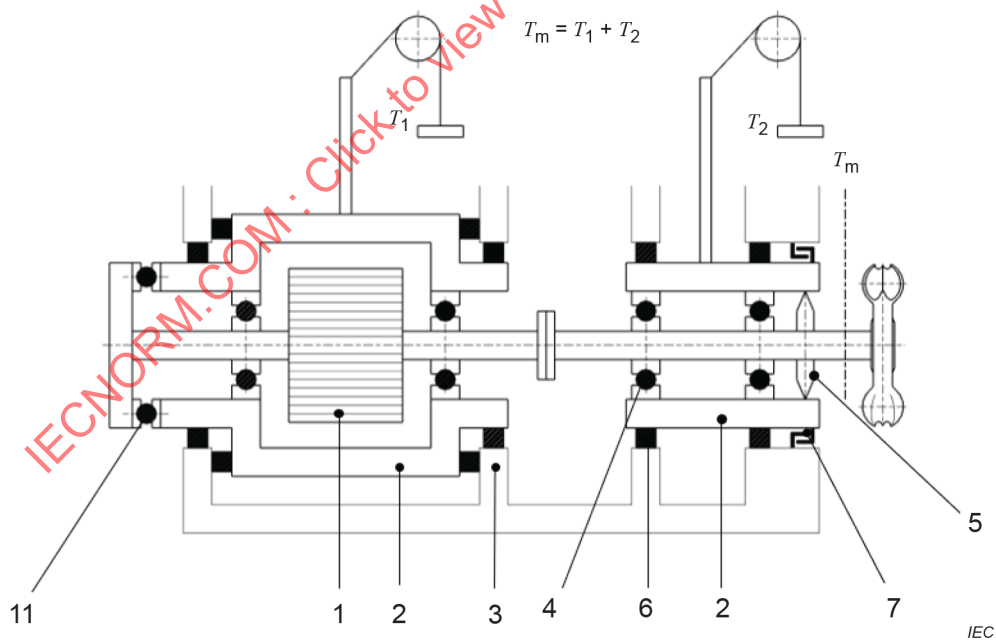
Tableau 6 – Nomenclature pour la Figure 28 à la Figure 33

Élément	Description
1	partie tournante
2	cadre oscillant
3	partie fixe
4	palier de la partie tournante en équilibre
5	joint mécanique en équilibre
6	palier à faible frottement du cadre oscillant
7	joint labyrinthe, membrane
8	palier de la partie tournante en déséquilibre
9	joint mécanique de la partie tournante en déséquilibre
10	couplemètre
11	palier de butée axial
— — —	section de référence pour le mesurage du couple



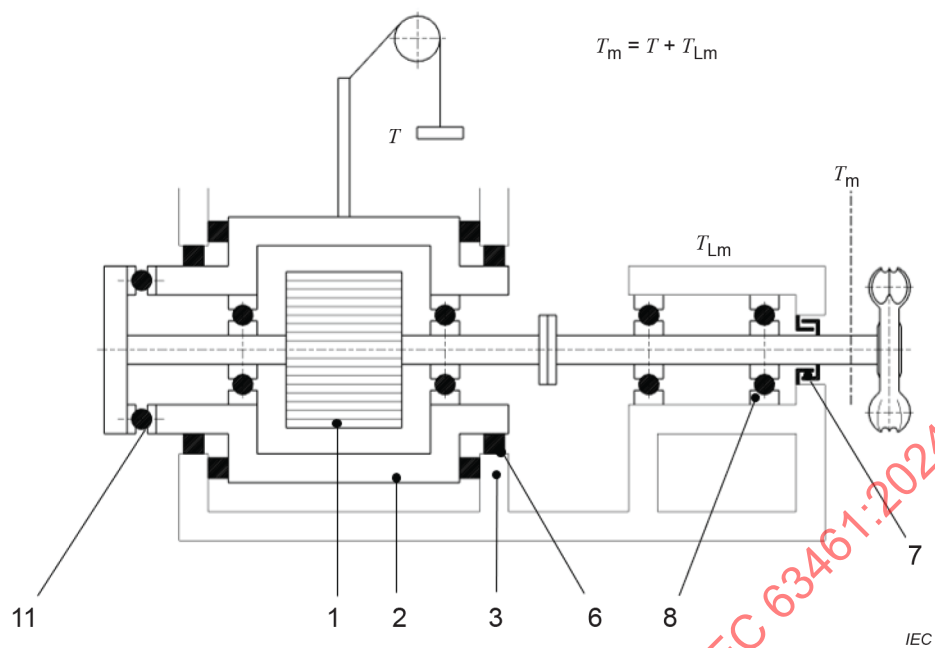
Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

Figure 28 – Montage en équilibre



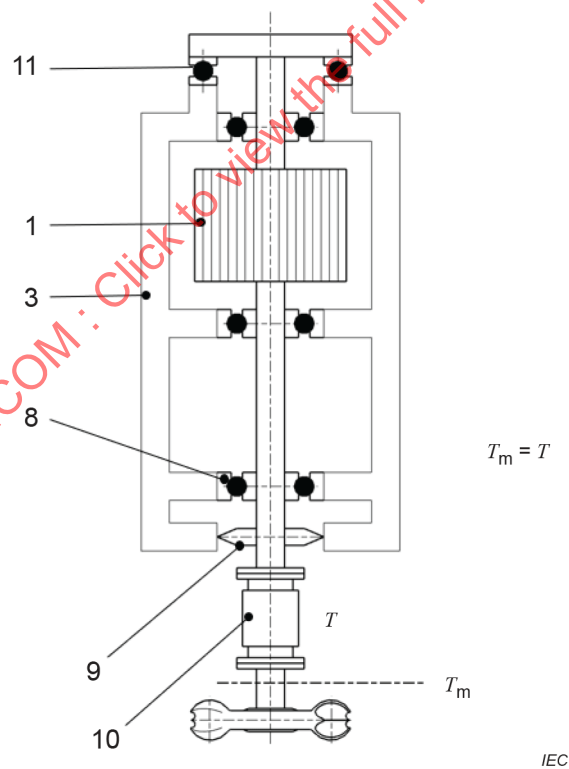
Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

Figure 29 – Montage en équilibre avec deux cadres distincts



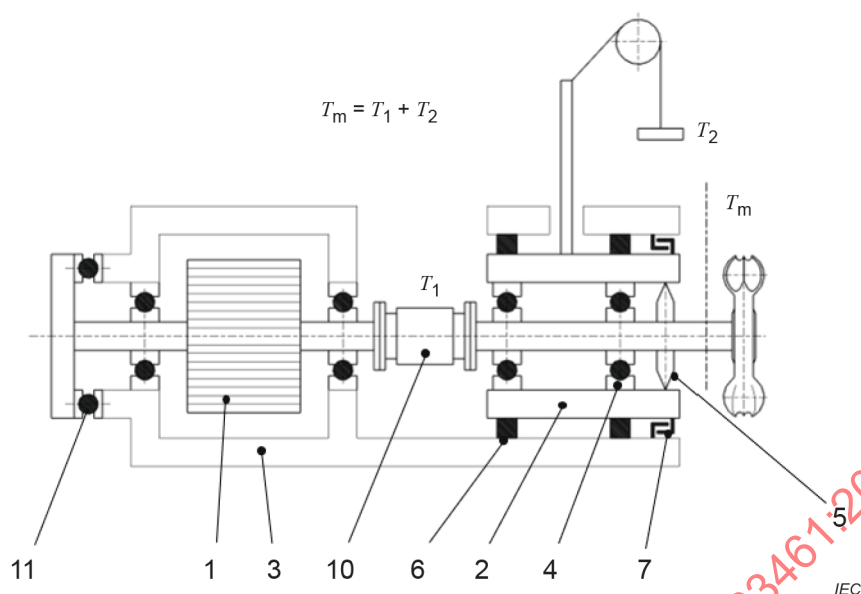
Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

Figure 30 – Montage avec des paliers et joints (de la machine) en déséquilibre



Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

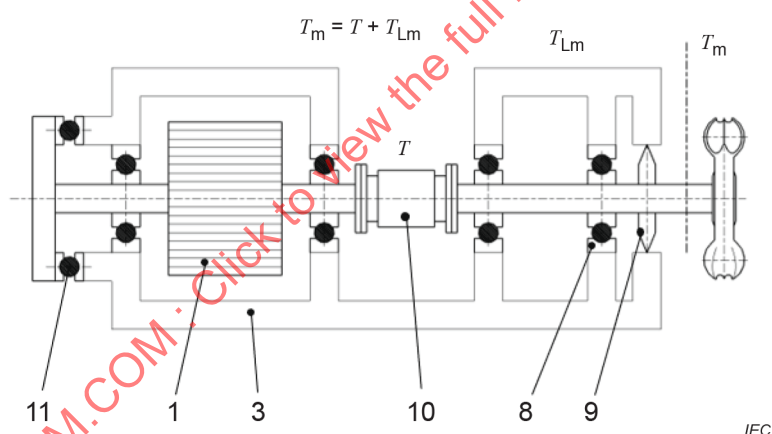
Figure 31 – Montage utilisant un couplemètre



Également valable pour une disposition verticale.

Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

Figure 32 – Montage utilisant un couplemètre avec des paliers et joints (de la machine) en équilibre



Également valable pour une disposition verticale.

Voir le Tableau 6 pour la nomenclature.

Figure 33 – Montage utilisant un couplemètre avec des paliers et joints (de la machine) en déséquilibre

7.4.4.2 Suspension du cadre oscillant

Pour satisfaire aux exigences relatives à l'incertitude de mesure sur la plage de mesure, des paliers spéciaux à faible frottement sont nécessaires pour suspendre le cadre oscillant, c'est-à-dire des paliers hydrostatiques à l'huile ou à l'eau. Il convient d'équilibrer parfaitement le cadre oscillant, sinon il est nécessaire de limiter le mouvement de rotation.

7.4.4.3 Pertes par ventilation

Quelle que soit la vitesse du moteur/générateur, il ne doit pas y avoir de réaction de couple causée par la ventilation ou par une soufflerie; s'il y en a une, elle doit être prise en compte.

7.4.4.4 Raccordements au fluide de refroidissement

L'appareil de mesure du couple doit être conçu de manière que le fluide de refroidissement entre et sorte sans introduire d'erreurs dues aux composantes de vitesse tangentielle. Les tuyaux souples (s'ils sont utilisés) ne doivent pas imposer de contrainte tangentielle mesurable, en particulier lorsqu'ils sont sous pression. Il faut démontrer que les amortisseurs à fluide (s'ils sont utilisés) opposent une résistance égale aux mouvements dans les deux sens. En outre, les presse-étoupes de l'arbre qui retiennent le liquide ne doivent pas imposer de couple de frottement sensible ou doivent être équipés d'un appareil de mesure du couple.

7.4.4.5 Joints

Lorsque l'étanchéité entre les parties oscillantes et les parties fixes est assurée par des joints à frottement ou des opercules, ceux-ci doivent être étalonnés.

7.4.4.6 Fils électriques

Les connexions électriques ne doivent pas imposer de contrainte tangentielle mesurable. Des fils de cuivre souples tressés ou des pots de mercure conviennent à cet effet.

7.4.5 Vérification du système

7.4.5.1 Généralités

Les contrôles décrits ci-dessous sont recommandés pour vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble du montage de mesure du couple; néanmoins, l'appareil de mesure doit être étalonné.

7.4.5.2 Essai de sensibilité

La sensibilité d'un montage d'essai indique la plus petite différence de couple qui peut être mesurée par le système. La sensibilité dépend fortement de la disposition et de la capacité du montage. Une sensibilité réduite peut résulter d'un fonctionnement incorrect.

En fonction de la disposition et de la capacité du montage utilisé, la sensibilité doit être comprise entre 0,05 N·m et 0,5 N·m, la valeur la plus faible étant valable pour $T_{m,max} < 500 \text{ N·m}$.

7.4.5.3 Essai de vitesse

Cet essai est effectué avec une roue démontée ou un arbre déconnecté. Le système fonctionne correctement lorsque le couple mécanique T_m reste nul pour toute la plage de vitesses.

7.4.5.4 Contrepoids

Au cours de ce contrôle, le couple/la force appliqué(e), ou une partie de celui-ci/celle-ci, est contrebalancé(e) au moyen de masses certifiées. Le système fonctionne correctement lorsque l'affichage est réduit en fonction de la masse d'équilibrage.

7.4.6 Étalonnage

7.4.6.1 Méthode primaire

Les grandeurs suivantes doivent être mesurées lors de l'étalonnage:

- la longueur du levier de frein;
- la force exercée sur le levier de frein;
- la tare du levier de frein si nécessaire.

La force agissant sur le levier de frein doit être appliquée au moyen de masses certifiées dans le sens des charges croissantes et décroissantes. Des rubans métalliques et des poulies sans frottement doivent être utilisés pour appliquer les masses d'équilibrage du couple.

7.4.6.2 Méthode secondaire

Lors de l'utilisation de cette méthode, un étalonnage du montage par rapport à une méthode primaire doit être effectué. Le couplemètre rotatif peut également être étalonné *in situ* par rapport à un couplemètre de référence certifié non rotatif.

7.4.6.3 Couple de frottement T_{Lm}

Lorsqu'une partie du montage palier/joint n'est pas incluse dans le cadre oscillant, le couple de frottement total T_{Lm} correspondant doit être déterminé par un essai approprié qui tient compte de la dépendance de la vitesse et de la pression du joint d'arbre.

7.4.7 Incertitude de mesure du couple (avec un niveau de confiance de 95 %)

7.4.7.1 Incertitude de mesure du couple de l'arbre par la méthode primaire

7.4.7.1.1 Longueur du bras de levier r

Il convient de mesurer la longueur du bras de levier r dans les limites suivantes:

$$f_{r,s} = \pm 0,05 \% \text{ à } \pm 0,1 \%$$

7.4.7.1.2 Force F

Il convient de mesurer la force F exercée sur le bras de levier dans les limites suivantes:

$$f_{F,s} = \pm 0,05 \% \text{ à } \pm 0,1 \%$$

7.4.7.2 Incertitude de mesure du couple de l'arbre par la méthode secondaire

L'incertitude due aux erreurs systématiques dans le mesurage du couple de l'arbre dépend fortement du dispositif utilisé. Il convient que l'incertitude prévue soit comprise entre

$$f_{T,s} = \pm 0,05 \% \text{ à } \pm 0,15 \%$$

7.4.7.3 Incertitude de mesure du couple de frottement T_{Lm}

Lorsque le montage palier/joint n'est pas inclus dans le système de cadre oscillant, il convient de mesurer le couple de frottement T_{Lm} dans les limites suivantes:

$$f_{TLm,s} = \pm 0,02 \% \text{ à } \pm 0,05 \% \text{ de } T_{m,max}$$

7.4.7.4 Incertitude totale de mesure du couple de la roue

En utilisant les incertitudes ci-dessus (voir le 7.4.7.1 au 7.4.7.3), l'incertitude relative due aux erreurs systématiques dans le mesurage du couple de la roue peut être calculée comme cela est indiqué ci-dessous:

- a) pour la méthode primaire avec T_{Lm} , mesurée avec le cadre oscillant courant (voir la Figure 29 et la Figure 30):

$$f_{Tm,s} = \sqrt{f_{r,s}^2 + f_{F,s}^2}$$

b) pour la méthode secondaire (voir la Figure 31):

$$f_{Tm,s} = f_{T,s} \text{ (définie en 7.4.7.2)}$$

c) pour la méthode primaire avec T_{Lm} , non mesurée avec le cadre oscillant (voir la Figure 30):
l'incertitude absolue due aux erreurs systématiques est:

$$e_{Tm} = \sqrt{T^2 f_{T,s}^2 + T_{Lm}^2 f_{T_{Lm},s}^2} = \sqrt{T^2 (f_{r,s}^2 + f_{F,s}^2) + T_{Lm}^2 f_{T_{Lm},s}^2}$$

et l'incertitude relative due aux erreurs systématiques est:

$$f_{Tm} = \frac{e_{Tm}}{T_m}$$

d) pour la méthode secondaire avec T_{Lm} , non mesurée avec le cadre oscillant (voir la Figure 33):

l'incertitude absolue due aux erreurs systématiques est:

$$e_{Tm} = \sqrt{T^2 f_{T,s}^2 + T_{Lm}^2 f_{T_{Lm},s}^2}$$

et l'incertitude relative due aux erreurs systématiques est:

$$f_{Tm} = \frac{e_{Tm}}{T_m}$$

7.5 Mesurage de la vitesse de rotation

7.5.1 Généralités

La détermination de la puissance mécanique de la roue exige de connaître la vitesse de rotation de l'arbre de la roue.

7.5.2 Méthodes de mesure de la vitesse

La vitesse de rotation du modèle de turbine/pompe peut être mesurée par l'une des méthodes suivantes:

- comptage des impulsions générées par l'arbre du modèle, à l'aide d'un compteur électronique et d'une base de temps. Le générateur d'impulsions peut être électrique ou optique;
- fréquencemètre électrique relié à un générateur directement entraîné par l'arbre du modèle;
- tachymètre électrique de haute précision qui comporte un aimant permanent stable directement entraîné par l'arbre du modèle.

7.5.3 Vérification

En général, l'appareil de mesure de la vitesse n'est pas véritablement étalonné, mais vérifié:

- soit par comparaison avec un autre appareil de mesure de la vitesse;
- soit par vérification séparée du comptage des impulsions et de l'exactitude de la base de temps.

En cas de dysfonctionnement, les erreurs possibles sont les suivantes:

- impulsions manquantes;
- changement de la base de temps.

7.5.4 Incertitude de mesure

En utilisant l'instrumentation susmentionnée, il est prévu que l'incertitude due aux erreurs systématiques soit comprise entre

$$f_{n,s} = \pm 0,01 \% \text{ à } \pm 0,05 \%$$

8 Exécution des essais et résultats

8.1 Généralités

Il est reconnu qu'aucune grandeur physique ne peut être mesurée sans erreur. Par conséquent, le résultat de tout mesurage est sans valeur lorsqu'il n'est pas accompagné de l'incertitude associée estimée à un niveau de confiance donné. Des exigences générales sur l'analyse et la combinaison des incertitudes sont données en 6.3.

Les grandeurs à mesurer lors d'un essai sur modèle pour vérifier les garanties des performances hydrauliques principales définies en 9.2 exigent un haut niveau d'exactitude. C'est la raison pour laquelle les spécifications données dans le présent paragraphe sont obligatoires pour que l'essai puisse être réputé conforme au présent document. Le paragraphe 8.3 donne des exigences sur la manière de calculer les grandeurs (puissance, rendement) qui sont dérivées des grandeurs de base (débit, énergie hydraulique massique, couple de l'arbre, vitesse de rotation).

Les grandeurs supplémentaires sont déterminées principalement à titre de recommandation, même si certaines d'entre elles peuvent présenter un intérêt contractuel (voir l'Article 10).

8.2 Détermination de E

8.2.1 Généralités

8.2.1.1 Objet

L'énergie hydraulique massique E de la machine doit être déterminée lors de tout essai sur une machine hydraulique modèle. Les grandeurs servant à la détermination de E sont mesurées en régime permanent sous forme de moyenne dans le temps. Les formules relatives à leur évaluation sont données en 3.4.7.1.

8.2.1.2 Méthode de détermination

Pour déterminer l'énergie hydraulique massique agissant sur la machine modèle, il est nécessaire d'évaluer l'énergie hydraulique massique de l'eau dans les sections de référence haute pression et basse pression.

Il convient de déterminer, dans la mesure du possible, la pression absolue, la vitesse débitante et l'élévation directement dans les sections de référence.

Dans certains cas, en raison d'un matériel d'essai sur modèle spécial, il peut être convenu d'un commun accord de choisir une section de mesure située aussi près que possible de la section de référence correspondante ou même de remplacer les mesurages de pression par des mesurages de niveau d'eau libre.

Le mesurage de la pression est décrit en 7.2, tandis que le mesurage du niveau d'eau libre, bien que rarement utilisé pour les essais sur modèle, est décrit en 7.3.

8.2.1.3 Régime permanent et nombre de lectures

Les lectures exigées à la détermination de l'énergie hydraulique massique doivent être effectuées à intervalles réguliers et en régime permanent, comme cela est défini en 8.5.3. Le nombre de lectures et les intervalles entre eux doivent permettre une approximation suffisamment bonne de la valeur moyenne, en tenant compte des performances du système d'acquisition de données (voir les 8.5.3 et 6.1).

8.2.2 Détermination de l'énergie hydraulique massique E

8.2.2.1 Sections de mesure

8.2.2.1.1 Généralités

Les conditions de base qui permettent de déterminer avec exactitude l'énergie hydraulique massique sont décrites en 8.2.1.2. Les exigences relatives au choix d'une section de mesure de la pression sont indiquées en 7.2.2.

8.2.2.1.2 Remplacement de sections de mesure

Les essais de réception sur modèle sont généralement effectués avec des mesurages aux sections de référence de la machine qui sont spécifiées dans le contrat. Ce n'est que dans des cas exceptionnels que les sections de mesure peuvent être différentes des sections de référence. Ce remplacement peut s'avérer nécessaire lorsque des perturbations de l'écoulement se produisent au niveau de la section de référence, causées par la machine ou par les conditions d'écoulement à l'entrée. Un tel remplacement doit être convenu par les parties. Dans ce cas, les composants qui influencent la configuration d'écoulement peuvent également être modélisés, lorsque cela a été convenu par contrat.

Un exemple de section de mesure déplacée est une vanne papillon proche de la section de référence haute pression qui requiert le déplacement de la section de mesure car il est difficile d'évaluer l'effet de la vanne sur le mesurage.

8.2.2.1.3 Correction de l'énergie hydraulique massique pour les sections de mesure remplacées

Lorsque la section de mesure n'est pas la section de référence, la perte d'énergie hydraulique massique entre la section de mesure et la section de référence doit être prise en compte, en prenant dûment en considération la direction et la distribution de l'écoulement et la position relative des deux sections. L'évaluation de cette perte peut être fondée sur des connaissances théoriques ou sur l'expérience pratique.

Avant de décider d'utiliser une section de mesure différente, il faut prendre dûment en considération l'incertitude introduite par le calcul de la perte par rapport à celle qui résulte de conditions de mesure insatisfaisantes au niveau de la section de référence.

8.2.2.2 Niveaux de référence

8.2.2.2.1 Point de référence

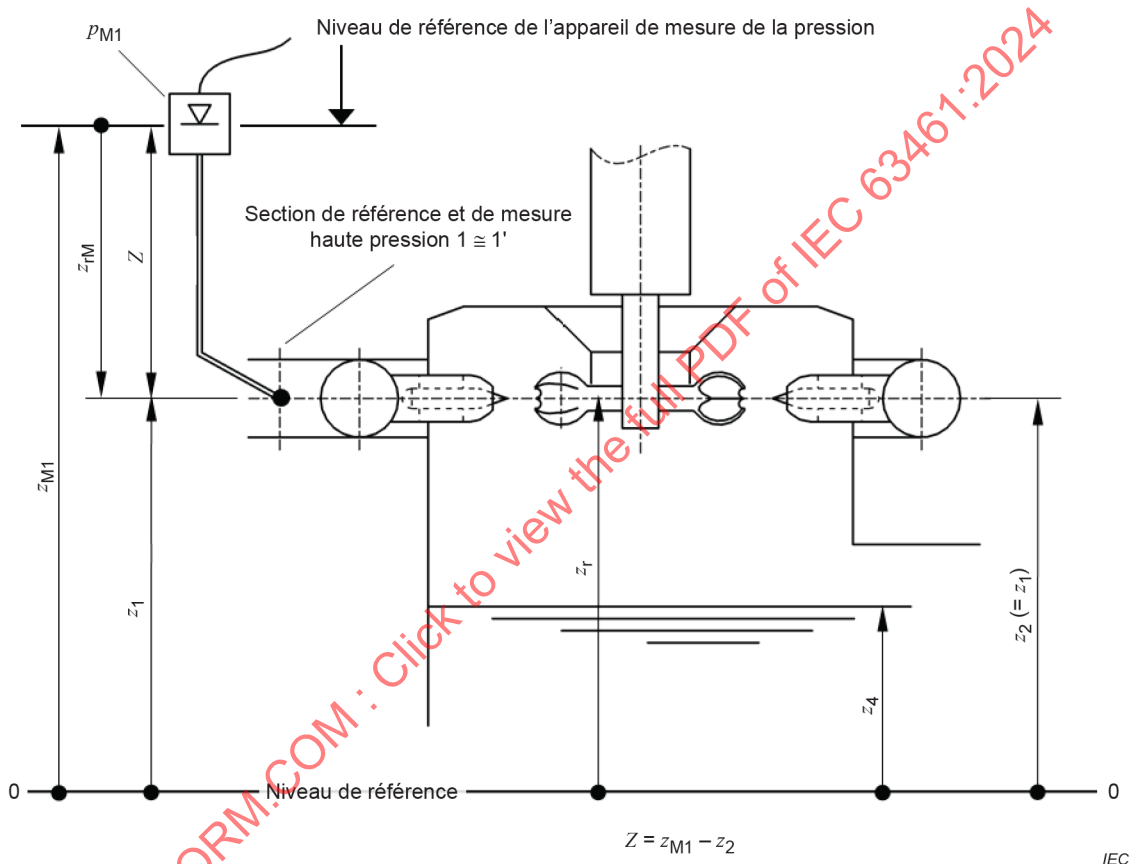
Toutes les élévations doivent être rapportées à un point de référence tel que le niveau de référence du banc d'essai ou le niveau de référence de la machine (voir le 3.4.8.2). La Figure 34 présente un exemple d'élévations et de hauteurs principales.

8.2.2.2.2 Différence d'élévation

Il est simplement important d'établir des différences d'élévation exactes. La différence d'élévation la plus importante pour les essais sur modèle est la différence entre le niveau de référence de la machine z_r et le niveau de référence de l'instrument de mesure de la pression z_M :

$$Z_{rM} = z_r - z_M$$

Lorsque le niveau de référence de tous les instruments de mesure de la pression est le même et lorsqu'il est pris comme point de référence, alors $z_{rM} = z_r$ (voir la Figure 34).



Cas spécial: $z_{M1} = 0$ et $z_{M2} = 0$, alors $Z_{rM1} = Z_{rM2} = z_r$

Figure 34 – Exemple présentant les élévations, hauteurs et niveaux de référence principaux du banc d'essai et de la machine modèle

8.2.2.3 Masse volumique de l'eau (voir le 4.3)

À partir de la définition de l'énergie hydraulique massique de la machine donnée en 3.4.7.1, la masse volumique moyenne de l'eau $\bar{\rho}$ doit être calculée comme la moyenne des masses volumiques aux deux sections de référence. Puisque la différence de température entre l'entrée et la sortie de la machine est faible, la température de l'eau dans la section de référence basse pression peut être utilisée pour calculer les masses volumiques impliquées dans l'évaluation de $\bar{\rho}$.