



# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE

---

**Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines –  
Model acceptance tests**

**Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines –  
Essais de réception sur modèle**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 27.140

ISBN 978-2-8322-6659-5

**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.....	13
1 Scope.....	15
2 Normative references .....	17
3 Terms, definitions, symbols and units .....	18
3.1 General.....	18
3.2 General terminology.....	18
3.3 Units .....	20
3.4 Definition of terms, symbols and units.....	20
3.4.1 List of terms and definitions by topic.....	20
3.4.2 Subscripts and symbols .....	21
3.4.3 Geometric terms .....	23
3.4.4 Physical quantities and properties .....	25
3.4.5 Discharge, velocity and speed terms .....	26
3.4.6 Pressure terms .....	27
3.4.7 Specific energy terms .....	27
3.4.8 Height and head terms .....	30
3.4.9 Power and torque terms.....	32
3.4.10 Efficiency terms .....	34
3.4.11 General terms relating to fluctuating quantities .....	35
3.4.12 Fluid dynamics and scaling terms <sup>a)</sup> .....	37
3.4.13 Dimensionless terms .....	38
3.4.14 Terms relating to additional performance data .....	39
4 Nature and extent of guarantees related to hydraulic performance .....	40
4.1 General.....	40
4.1.1 Design data and coordination .....	40
4.1.2 Definition of the hydraulic performance guarantees .....	40
4.1.3 Guarantees of correlated quantities .....	41
4.1.4 Form of guarantees .....	41
4.2 Main hydraulic performance guarantees verifiable by model test.....	41
4.2.1 Guaranteed quantities for any machine.....	41
4.2.2 Specific application.....	42
4.3 Guarantees not verifiable by model test .....	43
4.3.1 Guarantees on cavitation erosion .....	43
4.3.2 Guarantees on maximum momentary overspeed and maximum momentary pressure rise .....	44
4.3.3 Guarantees covering noise and vibration .....	44
4.4 Additional performance data .....	44
5 Execution of tests .....	45
5.1 Requirements of test installation and model .....	45
5.1.1 Choice of laboratory .....	45
5.1.2 Test installation .....	45
5.1.3 Model requirements .....	46
5.2 Dimensional check of model and prototype .....	49
5.2.1 General .....	49
5.2.2 Explanation of terms used for model and prototype.....	49
5.2.3 Purpose of dimensional checks.....	49
5.2.4 General rules.....	50

5.2.5	Procedure.....	51
5.2.6	Application for different types of machines.....	52
5.2.7	Methods .....	52
5.2.8	Accuracy of measurements.....	61
5.2.9	Dimensions of model and prototype to be checked .....	62
5.2.10	Permissible maximum deviations in geometrical similarity between prototype and model for turbines, pumps and pump-turbines .....	66
5.2.11	Surface waviness and roughness.....	71
5.3	Hydraulic similitude.....	74
5.3.1	Theoretical basic requirements and similitude numbers .....	74
5.3.2	Conditions for hydraulic similitude as used in this document.....	74
5.3.3	Similitude requirements for various types of model tests.....	75
5.3.4	Reynolds similitude.....	76
5.3.5	Froude similitude .....	77
5.3.6	Other similitude conditions.....	80
5.4	Test conditions .....	81
5.4.1	Determination of test conditions.....	81
5.4.2	Minimum values for model size and test conditions to be fulfilled .....	82
5.4.3	Stability and fluctuations during measurements .....	83
5.4.4	Adjustment of the operating point .....	83
5.5	Test procedures.....	83
5.5.1	Organization of tests.....	83
5.5.2	Inspections and calibrations .....	86
5.5.3	Execution of tests .....	88
5.5.4	Faults and repetition of tests .....	93
5.5.5	Final test report .....	94
5.6	Introduction to the methods of measurement.....	95
5.6.1	General .....	95
5.6.2	Measurements related to the main hydraulic performance guarantees .....	95
5.6.3	Measurements related to additional data .....	97
5.6.4	Acquisition and processing of data .....	97
5.7	Physical properties .....	97
5.7.1	General .....	97
5.7.2	Acceleration due to gravity .....	97
5.7.3	Physical properties of water.....	98
5.7.4	Physical conditions of atmosphere.....	104
5.7.5	Density of mercury.....	104
6	Main hydraulic performances: methods of measurement and results.....	105
6.1	Data acquisition and data processing.....	105
6.1.1	Overview .....	105
6.1.2	General requirements .....	105
6.1.3	Data acquisition.....	105
6.1.4	Component requirements.....	107
6.1.5	Check of the data acquisition system.....	110
6.2	Discharge measurement .....	112
6.2.1	General .....	112
6.2.2	Choice of the method of measurement.....	112
6.2.3	Accuracy of measurement .....	113
6.2.4	Primary methods .....	114

6.2.5	Secondary methods .....	115
6.3	Pressure measurement .....	118
6.3.1	General .....	118
6.3.2	Choice of pressure-measuring section .....	119
6.3.3	Pressure taps and connecting lines .....	119
6.3.4	Apparatus for pressure measurement .....	121
6.3.5	Calibration of pressure measurement apparatus .....	128
6.3.6	Vacuum measurements .....	129
6.3.7	Uncertainty in pressure measurements .....	129
6.4	Free water level measurement (see also ISO 4373) .....	129
6.4.1	General .....	129
6.4.2	Choice of water level measuring sections .....	130
6.4.3	Number of measuring points in a measuring section .....	130
6.4.4	Measuring methods .....	130
6.4.5	Uncertainty in free water level measurement .....	131
6.5	Determination of $E$ and $NPSE$ .....	132
6.5.1	General .....	132
6.5.2	Determination of the specific hydraulic energy $E$ .....	133
6.5.3	Simplified formulae for $E$ .....	135
6.5.4	Determination of the net positive suction-specific energy $NPSE$ .....	142
6.6	Shaft torque measurement .....	144
6.6.1	General .....	144
6.6.2	Methods of torque measurement .....	144
6.6.3	Methods of absorbing/generating power .....	145
6.6.4	Layout of arrangement .....	145
6.6.5	Checking of system .....	150
6.6.6	Calibration .....	150
6.6.7	Uncertainty in torque measurement (at a confidence level of 95 %) .....	151
6.7	Rotational speed measurement .....	152
6.7.1	General .....	152
6.7.2	Methods of speed measurement .....	152
6.7.3	Checking .....	152
6.7.4	Uncertainty of measurement .....	152
6.8	Computation and presentation of test results .....	153
6.8.1	General .....	153
6.8.2	Power, discharge and efficiency in the guarantee range .....	158
6.8.3	Computation of steady-state runaway speed and discharge .....	171
6.9	Error analysis .....	176
6.9.1	Definitions .....	176
6.9.2	Determination of uncertainties in model tests .....	178
6.10	Comparison with guarantees .....	182
6.10.1	General .....	182
6.10.2	Interpolation curve and total uncertainty bandwidth .....	183
6.10.3	Power, discharge and/or specific hydraulic energy and efficiency in the guarantee range .....	184
6.10.4	Runaway speed and discharge .....	188
6.10.5	Cavitation guarantees .....	189
7	Additional performance data – Methods of measurement and results .....	191
7.1	Introduction to additional data measurement .....	191

7.1.1	General .....	191
7.1.2	Test conditions and test procedures .....	192
7.1.3	Uncertainty in measurements .....	192
7.1.4	Model to prototype conversion .....	192
7.2	Fluctuating quantities .....	193
7.2.1	Data acquisition and processing for measurement of fluctuating quantities .....	193
7.2.2	Pressure fluctuations .....	197
7.2.3	Shaft torque fluctuations .....	213
7.3	Axial and radial thrust .....	214
7.3.1	General .....	214
7.3.2	Hydraulic axial thrust .....	215
7.3.3	Radial thrust .....	223
7.4	Hydraulic loads on control components .....	226
7.4.1	General .....	226
7.4.2	Guide vane torque .....	227
7.4.3	Runner blade torque .....	233
7.4.4	Pelton needle force and deflector torque .....	237
7.5	Testing in an extended operating range .....	241
7.5.1	General .....	241
7.5.2	Four quadrants .....	241
7.5.3	Operating modes (see Figure 116) .....	243
7.5.4	Scope of tests .....	244
7.5.5	Methods of testing in the extended operating range .....	246
7.6	Differential pressure measurement in view of prototype index test .....	248
7.6.1	General .....	248
7.6.2	Purpose of test .....	249
7.6.3	Execution of test .....	249
7.6.4	Analysis of test results .....	249
7.6.5	Transposition to prototype conditions .....	250
7.6.6	Uncertainty .....	250
Annex A (informative)	Dimensionless terms .....	251
Annex B (normative)	Physical properties, data .....	253
Annex C (informative)	Summarized test and calculation procedure .....	261
C.1	General .....	261
C.2	Agreements to be reached prior to testing .....	261
C.3	Model, test facility and instrumentation .....	262
C.3.1	Model manufacture and dimensional checks .....	262
C.3.2	Test facility instrumentation and data acquisition system .....	262
C.4	Tests and calculation of the model values .....	262
C.4.1	Test types .....	262
C.4.2	Measurement of the main quantities during the test .....	263
C.4.3	Uncertainty of the measured quantities .....	263
C.4.4	Calculation of the quantities related to the main hydraulic performance .....	263
C.4.5	Calculation of the dimensionless factors or coefficients and of the Thoma number .....	263
C.4.6	Determination of $\delta_{ref}$ for the transposition of efficiency .....	264
C.4.7	Calculation of efficiency and power coefficients referred to $Re_M^*$ .....	264

C.4.8	Correction of the model-measured values taking into account the influence of cavitation .....	264
C.5	Calculation of prototype quantities .....	264
C.6	Plotting of model or prototype results .....	264
C.7	Comparison with the guarantees .....	265
C.8	Final protocol .....	265
C.9	Final test report .....	265
Annex D (normative)	The scale effect on hydraulic efficiency for reaction machines .....	266
D.1	Basic statements and assumptions .....	266
D.2	Efficiency transposition formulae .....	266
D.2.1	Derivation of the general formula for efficiency transposition .....	266
D.2.2	Amount of relative scalable losses in the range of guaranteed efficiencies .....	267
D.2.3	Determination of the effect of scaling on the efficiency of the model .....	269
D.2.4	Determination of the formula for the transposition of efficiency from model to prototype .....	271
Annex E (informative)	Comparison of the hydraulic efficiency transposition methods of IEC 60193 and IEC 62097 for reaction machines .....	273
E.1	IEC 60193 transposition method .....	273
E.1.1	Applications .....	273
E.1.2	Limitations .....	273
E.2	IEC 62097 transposition method .....	274
E.2.1	Applications .....	274
E.2.2	Limitations .....	274
Annex F (normative)	Computation of the prototype runaway characteristics taking into account friction and windage losses of the unit .....	275
Annex G (informative)	Example of determination of the best smooth curve: method of separate segments .....	276
G.1	General .....	276
G.2	Principle of the method .....	276
G.3	Choice of the minimum width of the intervals .....	278
G.4	Determination of the intervals .....	278
Annex H (informative)	Examples of analysis of sources of error and uncertainty evaluation .....	279
H.1	General .....	279
H.2	Example of analysis of sources of error and of uncertainty evaluation in the measurement of a physical quantity .....	279
H.2.1	General .....	279
H.2.2	Errors arising during calibration .....	280
H.2.3	Errors arising during the tests .....	281
H.3	Example of calculation of uncertainty due to systematic errors in the determination of the specific hydraulic energy, mechanical runner/impeller power and hydraulic efficiency .....	281
H.3.1	General .....	281
H.3.2	Discharge .....	282
H.3.3	Pressure .....	282
H.3.4	Specific hydraulic energy .....	282
H.3.5	Power .....	283
H.3.6	Hydraulic efficiency .....	283
H.4	Example of calculation of uncertainty due to systematic errors in the determination of the net positive suction specific energy .....	284

H.4.1	General .....	284
H.4.2	Discharge .....	284
H.4.3	Pressure .....	284
H.4.4	Net positive suction specific energy .....	284
Annex I (normative)	The scale effect on hydraulic efficiency for Pelton turbines .....	286
I.1	General.....	286
I.2	Similarity considerations .....	286
I.3	Transposition formula .....	288
Annex J (normative)	Analysis of random errors for a test at constant operating conditions .....	289
J.1	General.....	289
J.2	Standard deviation .....	289
J.3	Confidence levels .....	290
J.4	Student's <i>t</i> distribution .....	290
J.5	Maximum permissible value of uncertainty due to random errors.....	291
J.6	Example of calculation .....	292
Annex K (normative)	Calculation of plant Thoma number $\sigma_{pl}$ .....	293
K.1	Definition of $\sigma_{pl}$ , <i>NPSE</i> and <i>NPSH</i> .....	293
K.2	Data needed to calculate $\sigma_{plc}$ .....	294
Annex L (informative)	Flux diagram of specific hydraulic energy, flow and power .....	296
Annex M (informative)	Synchronous and asynchronous components of pressure signals .....	299
Annex N (informative)	Natural frequency of the hydraulic system .....	301
Annex O (informative)	Calculation of axial force components .....	302
O.1	General.....	302
O.2	Calculating the force acting on the runner crown ( $F_2$ ) .....	302
O.2.1	General .....	302
O.2.2	Pressure specific energy losses due to seal clearance .....	302
O.2.3	Pressure specific energy losses through the centrifugal zones between the stationary and rotating parts .....	304
O.2.4	Pressure specific energy losses in a pressure relief/equilibrium pipe .....	305
O.2.5	Additional specific energy losses .....	306
O.3	Calculating the force acting on the runner band ( $F_3$ ).....	307
Bibliography.....		308
Figure 1–	Schematic representation of a hydraulic machine.....	22
Figure 2 –	Guide vane opening and angle .....	22
Figure 3 –	Reference diameter and bucket width .....	24
Figure 4 –	Determination of $\sigma_0$ and $\sigma_1$ for typical cavitation curves.....	29
Figure 5 –	Reference level of machine .....	31
Figure 6 –	Flux diagram for power and discharge.....	33
Figure 7 –	Illustration of some definitions related to oscillating quantities.....	36
Figure 8 –	Procedure for dimensional checks, comparison of results "steel to steel" and application of tolerances for model and prototype .....	51
Figure 9 –	Example of spiral case and distributor dimensions to be checked.....	54
Figure 10 –	Example of draft tube dimensions to be checked .....	54

Figure 11 – Example of the dimensions to be checked on a bulb unit.....	55
Figure 12 – Example of the dimensions to be checked on the runner/impeller of a radial flow machine .....	56
Figure 13 – Runner/impeller of radial flow machine: examples of locations for blade profile measuring sections for templates or measuring points for CMM .....	57
Figure 14 – Runner/impeller of radial flow machine: check of outlet width and blade profiles by means of templates as illustrated on a Francis runner .....	57
Figure 15 – Runner/impeller of radial flow machine: check of inlet and outlet widths between blades (example of a pump-turbine runner).....	58
Figure 16 – Runner/impeller of axial flow machine: example of locations for blade profile measuring sections for templates or measuring points for CMM .....	58
Figure 17 – Runner/impeller of axial flow machine: definition of blade adjustment and of blade profile tolerances.....	58
Figure 18 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the distributor and the housing of vertical and horizontal shaft machines .....	59
Figure 19 – Pelton turbine: example of dimensions to be checked on the buckets and nozzles .....	60
Figure 20 – Definition of waviness and surface roughness .....	72
Figure 21 – Low specific hydraulic energy turbine example of recommended maximum surface roughness values on the runner blades (pressure side and suction side).....	73
Figure 22 – Relation between the setting level $z_f$ of a Francis turbine and the cavitation reference level $z_c$ .....	78
Figure 23 – Dependence of $\sigma$ values on level $z$ for model and prototype .....	78
Figure 24 – Acceleration due to gravity $g$ ( $m \cdot s^{-2}$ ) .....	98
Figure 25 – Density of distilled water $\rho_{wd}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) .....	101
Figure 26 – Time multiplexing data acquisition system.....	106
Figure 27 – Bus operated data acquisition system .....	107
Figure 28 – Time delay .....	108
Figure 29 – Typical low-pass filter attenuation characteristics .....	109
Figure 30 – Different measurement chains and their recommended checkpoints .....	111
Figure 31 – Examples of pressure taps .....	120
Figure 32 – Types of pressure manifolds: a) with separate connecting lines to manifold and b) with ring manifold.....	121
Figure 33 – Examples of experimental setup of liquid column manometers .....	123
Figure 34 – Dead weight manometer with compensation by pressure or force transducer (example of experimental set-up) .....	126
Figure 35 – Pressure weighbeam (example of experimental set-up).....	127
Figure 36 – Stilling well.....	130
Figure 37 – Point and hook gauges.....	131
Figure 38 – Example showing main elevations, heights and reference levels of the test rig and model machine.....	134
Figure 39 – Determination of specific hydraulic energy through differential pressure measuring instrument .....	137
Figure 40 – Determination of specific hydraulic energy of the machine through separate measurement of gauge pressures .....	138
Figure 41 – Determination of specific hydraulic energy of the machine through separate measurement of pressures by water column manometers.....	139



Figure 42 – Pelton turbines with vertical axis: determination of specific hydraulic energy of the machine .....	140
Figure 43 – Pelton turbines with horizontal axis: determination of specific hydraulic energy of the machine .....	141
Figure 44 – Low-head machines: determination of specific hydraulic energy of the machine using free water levels .....	142
Figure 45 – Determination of net positive suction energy <i>NPSE</i> and net positive suction head <i>NPSH</i> .....	143
Figure 46 – Balance arrangement .....	146
Figure 47 – Balance arrangement with gear .....	147
Figure 48 – Balance arrangement with two separate frames .....	147
Figure 49 – Arrangement with machine bearings and seals not in balance .....	147
Figure 50 – Arrangement with lower bearing and seal not in balance .....	148
Figure 51 – Arrangement with intermediate bearing and seal not in balance .....	148
Figure 52 – Arrangement using a torquemeter .....	148
Figure 53 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals in balance.....	149
Figure 54 – Arrangement using a torquemeter with machine bearings and seals not in balance.....	149
Figure 55 – Choosing the appropriate transposition method.....	153
Figure 56 – Single-regulated (Francis) model turbine: performance hill diagram (discharge factor versus speed factor) .....	155
Figure 57 – Single-regulated (Francis) model turbine: performance hill diagram (energy coefficient versus discharge coefficient).....	155
Figure 58 – Double-regulated (Kaplan) model turbine: performance hill diagram .....	156
Figure 59 – Single-regulated (radial) model pump: performance diagram.....	156
Figure 60 – Double-regulated model pump: performance diagram.....	157
Figure 61 – Pelton model turbine: performance hill diagram (example for a six-nozzle machine).....	157
Figure 62 – Single-regulated (radial) model pump-turbine: general four-quadrant diagram .....	158
Figure 63 – Reaction machines: procedure for calculating test results in view of comparison with guarantees .....	159
Figure 64 – Single-regulated turbine: three-dimensional surface of hydraulic efficiency and curves of performance at $E_{nD}$ constant.....	161
Figure 65 – Single-regulated pump: performance curves.....	162
Figure 66 – Double-regulated turbine: performance curves at $E_{nD}$ constant .....	163
Figure 67 – Double-regulated pump: performance curves at $E_{nD}$ constant.....	164
Figure 68 – Non-regulated turbine: performance curves.....	165
Figure 69 – Non-regulated pump: performance curves .....	166
Figure 70 – Efficiency curve correction in order to take into account cavitation influence (e.g. tubular machines at overload operation) .....	167
Figure 71 – Francis model turbine: cavitation curves.....	167
Figure 72 – Model pump: cavitation curves .....	167
Figure 73 – Francis model turbine cavitation curves: examples of limits for application of transposition formula .....	169
Figure 74 – Runaway curves for a single-regulated turbine (Francis) .....	172

Figure 75 – Runaway curves for a single-regulated turbine (six-nozzle Pelton) .....	172
Figure 76 – Runaway speed determined by extrapolation: example for a single-regulated turbine (Francis).....	172
Figure 77 – Influence of Thoma number on runaway speed and discharge of a single-regulated turbine (Francis).....	173
Figure 78 – Influence of the Thoma number on runaway speed and discharge of a double-regulated turbine (Kaplan).....	174
Figure 79 – Influence of the Thoma number on the off-cam runaway curves of a double-regulated turbine (Kaplan).....	174
Figure 80 – Example of calibration curve .....	178
Figure 81 – Single-regulated machine.....	184
Figure 82 – Double-regulated machine .....	184
Figure 83 – Single-regulated turbine: comparison between guarantees and measurements .....	185
Figure 84 – Non-regulated turbine: comparison between guarantees and measurements .....	186
Figure 85 – Non-regulated pump: comparison between guarantees and measurements .....	187
Figure 86 – Francis turbine runaway speed and discharge curves: comparison between guarantees and measurements .....	189
Figure 87 – Model turbine cavitation curve and comparison with the guarantee on the influence of the cavitation on the efficiency.....	190
Figure 88 – Typical data acquisition system.....	194
Figure 89 – Frequency response of analogue anti-aliasing filter .....	195
Figure 90 – Suggested locations of transducers.....	200
Figure 91 – Pump diagram with exploration paths .....	202
Figure 92 – Turbine hill-chart with exploration paths .....	203
Figure 93 – Normal pump mode operation of an $n_{QE} = 0,102$ pump-turbine model .....	205
Figure 94 – Zero discharge operation (10 % guide vane opening) of an $n_{QE} = 0,102$ pump-turbine model .....	205
Figure 95 – Part load operation of an $n_{QE} = 0,321$ Francis turbine model: $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 0,719$ .....	206
Figure 96 – Higher part load operation of an $n_{QE} = 0,226$ Francis turbine model: $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 0,764$ .....	207
Figure 97 – Full load operation of an $n_{QE} = 0,173$ Francis turbine model: $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 1,218$ .....	208
Figure 98 – Example of waterfall diagram of pressure fluctuations in the draft tube of a Francis turbine, transducer $p_1$ .....	209
Figure 99 – Example of summarized diagram of pressure fluctuations in the draft tube of a Francis turbine, transducer $p_2$ .....	210
Figure 100 – Interaction of the external system with sources of pressure fluctuations from the hydraulic machine.....	211
Figure 101 – Definition of coordinate system .....	214
Figure 102 – Individual elements of axial force acting on a radial machine.....	216
Figure 103 – Typical testing arrangement for axial thrust measurement.....	218
Figure 104 – Typical calibration arrangement for axial thrust measurement .....	219

Figure 105 – Axial force factor versus discharge factor at different constant specific hydraulic energies in pump mode.....	221
Figure 106 – Axial force factor versus speed factor measured at different guide vane openings in the four quadrants of a pump-turbine .....	221
Figure 107 – Typical arrangements for radial thrust measurement (horizontal or vertical shaft) .....	224
Figure 108 – Design examples for torque measuring guide vanes .....	228
Figure 109 – Guide vane torque factor versus guide vane angle measured at different constant specific hydraulic energies in turbine mode.....	230
Figure 110 – Guide vane torque factor versus guide vane angle measured at different constant specific hydraulic energies in pump mode.....	231
Figure 111 – Guide vane torque factor versus speed factor measured at different constant guide vane angles in the four quadrants of a pump-turbine .....	231
Figure 112 – Example for runner blade torque measuring arrangement using telemetry .....	234
Figure 113 – Performance and hydraulic runner blade torque characteristics of an axial turbine measured at one constant runner blade angle $\beta$ and various constant guide vane angles $\alpha$ .....	236
Figure 114 – Pelton needle force factor as a function of relative needle stroke .....	240
Figure 115 – Example of four quadrants operation of a radial-type pump-turbine .....	242
Figure 116 – Chart illustrating the various operating modes .....	244
Figure 117 – S-shape characteristics in turbine brake mode .....	247
Figure 118 – Characteristic of a pump with positive slope range in a limited discharge range .....	247
Figure 119 – Example of graphical representation of index test data.....	250
Figure D.1 – Efficiency change in hydraulically similar operating conditions A and B having different $Re$ values .....	267
Figure D.2 – Variation of relative scalable losses .....	268
Figure D.3 – Transposition curve for model efficiency using best efficiency point.....	270
Figure D.4 – Efficiency increase from constant $Re_{M^*}$ to constant $Re_P$ .....	271
Figure D.5 – Efficiency increase from different $Re_M$ to constant $Re_P$ .....	272
Figure F.1 – Single-regulated turbine: determination of the maximum runaway speed of the prototype taking into account the friction and windage losses of the unit .....	275
Figure G.1 – Principle of the method of separate segments .....	277
Figure G.2 – Example of determination of intervals .....	277
Figure I.1 – Influence of Froude number .....	287
Figure I.2 – Influence of Weber number .....	288
Figure I.3 – Influence of Reynolds number.....	288
Figure K.1 – Definition for determination of net positive suction energy, $NPSE$ , and net positive suction head, $NPSH$ , of a prototype machine ( $E_{LS} \neq 0$ ).....	293
Figure L.1 – Turbine .....	296
Figure L.2 – Pump .....	297
Figure M.1 – a) Representation of asynchronous pressure pulsation and location of pressure transducers, and b) synchronous and c) asynchronous parts of the pressure signal.....	300
Figure O.1 – Crown seal clearance .....	304
Figure O.2 – Crown radius .....	305
Figure O.3 – Pressure relief pipe .....	306

Figure O.4 – Runner band seal .....	307
Table 1 – Permissible maximum deviations .....	68
Table 2 – Maximum recommended prototype surface roughness $Ra$ .....	73
Table 3 – Similitude numbers .....	74
Table 4 – Similitude requirements for various types of model tests .....	76
Table 5 – Minimum values for model size and test parameters .....	82
Table 6 – Coefficients of the Herbst and Roegenner formula .....	100
Table 7 – Minimum test specific hydraulic energy .....	102
Table 8 – Nomenclature for Figure 46 to Figure 54 .....	146
Table 9 – Variables defining the operating point of a machine .....	154
Table 10 – Summary of errors that determine total measurement uncertainty .....	179
Table 11 – Definition of individual force elements of axial thrust .....	217
Table 12 – Non-hydraulic forces influencing radial thrust measurement .....	225
Table 13 – Definition of quadrants and operating modes .....	242
Table B.1 – Acceleration due to gravity $g$ ( $m \cdot s^{-2}$ ) .....	253
Table B.2 – Density of distilled water $\rho_{Wd}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) (1 of 2) .....	254
Table B.3 – Kinematic viscosity of distilled water $\nu$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) .....	256
Table B.4 – Vapour pressure of distilled water $p_{Va}$ (Pa) .....	257
Table B.5 – Density of dry air $\rho_a$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) .....	258
Table B.6 – Ambient pressure $p_{amb}$ (Pa) .....	259
Table B.7 – Density of mercury $\rho_{Hg}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) .....	260
Table D.1 – $V_{ref}$ values .....	269
Table I.1 – Numerical data for surface tension $\sigma^*$ .....	287
Table J.1 – Confidence levels .....	290
Table J.2 – Values of Student's $t$ .....	291
Table J.3 – Computation of the estimated standard deviation and the uncertainty for eight observations .....	292
Table K.1 – Summary of calculated $\sigma_{plc}$ values and other relevant data .....	295

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60193 has been prepared by IEC technical committee 4: Hydraulic turbines.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1999. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) update to methods/measuring tools currently used for checking dimensions on both model and prototype;
- b) update to requirements of accuracy in the dimensional check procedure as a result of new technology;

- c) merging of tables/sections with redundant information in dimension check in 5.2;
- d) update to methods of measuring discharge;
- e) update to pressure fluctuation methods and terminology;
- f) specification of measuring times for accurate pressure fluctuation analyses in the model;
- g) redefine definition for the transposition of pressure fluctuations to prototype;
- h) update to surface waviness requirements in prototype;
- i) redefining methods/references in clause on cavitation nuclei content (5.7.3.2.2);
- j) update to 7.3 and review of methods on radial thrust measurements;
- k) update to 7.4 (Hydraulic loads on control components);
- l) update and develop methodology in 7.5 for testing in the extended operating range;
- m) update to 7.6 concerning index testing;
- n) update to methods for measuring roughness;
- o) updates to references;
- p) updates to figures;
- q) revision of sigma definition;
- r) reference to new method of transposition in accordance with IEC 62097.

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

FDIS	Report on voting
4/371/FDIS	4/373/RVD

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

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

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

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

## HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES – MODEL ACCEPTANCE TESTS

### 1 Scope

This document applies to laboratory models of any type of impulse or reaction hydraulic turbine, storage pump or pump-turbine.

This document applies to models of prototype machines either with unit power greater than 5 MW or with reference diameter greater than 3 m. Full application of the procedures herein prescribed is not generally justified for machines with smaller power and size. Nevertheless, this document may be used for such machines by agreement between the purchaser and the supplier.

In this document, the term "turbine" includes a pump-turbine operating as a turbine and the term "pump" includes a pump-turbine operating as a pump.

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 hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines to determine if the main hydraulic performance contract guarantees (see 4.2) have been satisfied.

It contains the rules governing test conduct and prescribes 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 4.4) can be needed for the design or the operation of the prototype of the hydraulic machine. Contrary to the requirements of Clauses 4 to 6 related to main hydraulic performance, the information of these additional data given in Clause 7 is considered only as recommendation or guidance to the user (see 7.1).

It is particularly recommended that model acceptance tests be 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.

A transposition method taking into account the model and prototype wall surface roughness for the performance conversion on pump-turbines, Francis turbines, and axial machines is described in IEC 62097. This method requires model and prototype surface roughness data and takes into account the shift in  $n_{ED}$ ,  $Q_{ED}$  and  $P_{ED}$  factors for determining the transposition of efficiency between model and prototype. However, in the case of Francis machines with semi-spiral casing and axial machines, the transposition method has not been fully validated due to a lack of data. In addition, IEC 62097 does not apply to storage pumps, Pelton turbines, and Dériaz. Therefore, for these and otherwise specifically agreed upon cases where hydraulically smooth flow conditions are assumed on the model and the prototype, the transposition formula and procedure given in Annex D and Annex I can be applied. Applications and limitations of both this document and IEC 62097 transposition methods are discussed in Annex E.

The method for performance conversion from model to prototype needs to be clearly defined in the main hydraulic performance contract.

This document may 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.

IEC 62097:2009, *Hydraulic machines, radial and axial – Performance conversion method from model to prototype*

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 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – terms, definitions and surface texture parameters*

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

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	323
1 Domaine d'application .....	325
2 Références normatives .....	326
3 Termes, définitions, symboles et unités .....	327
3.1 Généralités .....	327
3.2 Terminologie générale .....	327
3.3 Unités .....	329
3.4 Définitions des termes, symboles et unités .....	329
3.4.1 Liste des termes et définitions par sujet .....	329
3.4.2 Indices et signes représentatifs .....	330
3.4.3 Termes géométriques .....	332
3.4.4 Grandeurs et propriétés physiques .....	334
3.4.5 Termes relatifs au débit, à la vitesse d'écoulement et à la vitesse de rotation .....	335
3.4.6 Termes relatifs à la pression .....	336
3.4.7 Termes relatifs à l'énergie massique .....	336
3.4.8 Termes relatifs à la hauteur géométrique et à la hauteur de charge .....	339
3.4.9 Termes relatifs à la puissance et au couple .....	341
3.4.10 Termes relatifs au rendement .....	343
3.4.11 Termes généraux relatifs aux grandeurs fluctuantes .....	343
3.4.12 Termes relatifs à la mécanique des fluides et à l'effet d'échelle <sup>a)</sup> .....	346
3.4.13 Termes adimensionnels .....	347
3.4.14 Termes relatifs aux données complémentaires de fonctionnement .....	348
4 Nature et étendue des garanties relatives au fonctionnement hydraulique .....	349
4.1 Généralités .....	349
4.1.1 Données du projet et coordination .....	349
4.1.2 Définition des garanties de performances hydrauliques .....	349
4.1.3 Garanties portant sur des grandeurs liées .....	350
4.1.4 Forme des garanties .....	350
4.2 Garanties principales de performances hydrauliques vérifiables par un essai sur modèle .....	350
4.2.1 Grandeurs garanties pour toute machine .....	350
4.2.2 Applications particulières .....	351
4.3 Garanties non vérifiables par des essais sur modèle .....	353
4.3.1 Garanties sur l'érosion de cavitation .....	353
4.3.2 Garanties sur la vitesse et la pression instantanées maxima maximorum ...	353
4.3.3 Garanties de bruit et de vibrations .....	353
4.4 Données complémentaires de fonctionnement .....	353
5 Exécution des essais .....	354
5.1 Exigences imposées à l'installation d'essai et au modèle .....	354
5.1.1 Choix du laboratoire .....	354
5.1.2 Installation d'essai .....	354
5.1.3 Exigences concernant le modèle .....	355
5.2 Contrôle dimensionnel du modèle et du prototype .....	357
5.2.1 Généralités .....	357
5.2.2 Explication des termes utilisés pour le modèle et le prototype .....	358
5.2.3 But du contrôle dimensionnel .....	358

5.2.4	Règles générales.....	358
5.2.5	Procédure.....	359
5.2.6	Application à différents types de machines .....	360
5.2.7	Méthodes .....	360
5.2.8	Précisions des mesures.....	369
5.2.9	Dimensions à contrôler sur le modèle et le prototype.....	370
5.2.10	Écart maximaux de similitude géométrique admissibles entre le prototype et le modèle pour les turbines, pompes et pompes-turbines .....	375
5.2.11	Ondulation et rugosité de surface .....	379
5.3	Similitude hydraulique.....	382
5.3.1	Exigences théoriques fondamentales et paramètres de similitude.....	382
5.3.2	Conditions de similitude hydraulique utilisées dans le présent document.....	382
5.3.3	Similitude requise pour les différents types d'essai sur modèle.....	383
5.3.4	Similitude de Reynolds .....	384
5.3.5	Similitude de Froude.....	385
5.3.6	Autres conditions de similitude .....	388
5.4	Conditions d'essai.....	389
5.4.1	Détermination des conditions d'essai.....	389
5.4.2	Valeurs minimales de la taille du modèle et conditions d'essai à respecter .....	390
5.4.3	Stabilité et fluctuations pendant les mesurages .....	391
5.4.4	Réglage du point de fonctionnement.....	391
5.5	Modalités d'exécution des essais .....	391
5.5.1	Organisation des essais .....	391
5.5.2	Inspections et étalonnages .....	394
5.5.3	Exécution des essais .....	396
5.5.4	Incidents et répétition des essais.....	401
5.5.5	Rapport d'essai final .....	402
5.6	Introduction aux méthodes de mesure.....	403
5.6.1	Généralités.....	403
5.6.2	Mesures liées aux garanties principales de performances hydrauliques.....	403
5.6.3	Mesures liées à des données complémentaires .....	405
5.6.4	Acquisition et traitement des données .....	405
5.7	Propriétés physiques .....	405
5.7.1	Généralités.....	405
5.7.2	Accélération due à la pesanteur.....	406
5.7.3	Propriétés physiques de l'eau.....	406
5.7.4	Propriétés physiques de l'atmosphère .....	412
5.7.5	Masse volumique du mercure .....	412
6	Performances hydrauliques principales: méthodes de mesurage et résultats.....	413
6.1	Acquisition et traitement des données.....	413
6.1.1	Vue d'ensemble.....	413
6.1.2	Spécifications générales.....	413
6.1.3	Acquisition des données.....	413
6.1.4	Spécification des composants.....	415
6.1.5	Contrôle du système d'acquisition des données.....	418
6.2	Mesurage du débit .....	420
6.2.1	Généralités.....	420
6.2.2	Choix de la méthode de mesurage.....	420

6.2.3	Exactitude de mesure .....	421
6.2.4	Méthodes primaires .....	422
6.2.5	Méthodes secondaires .....	423
6.3	Mesurage de la pression .....	426
6.3.1	Généralités .....	426
6.3.2	Choix de la section de mesure de la pression .....	427
6.3.3	Prises de pression et lignes de raccordement .....	427
6.3.4	Appareillage de mesure de la pression .....	429
6.3.5	Étalonnage des appareils de mesure de pression .....	436
6.3.6	Mesures de vide .....	436
6.3.7	Incertitude sur les mesures de pression .....	437
6.4	Mesurage du niveau libre (voir aussi ISO 4373) .....	437
6.4.1	Généralités .....	437
6.4.2	Choix des sections de mesurage du niveau libre .....	438
6.4.3	Nombre des points de mesurage dans une section .....	438
6.4.4	Méthodes de mesure .....	438
6.4.5	Incertitudes sur les mesures de niveau libre .....	439
6.5	Détermination de $E$ et $NPSE$ .....	440
6.5.1	Généralités .....	440
6.5.2	Détermination de l'énergie hydraulique massique $E$ .....	441
6.5.3	Formules simplifiées pour $E$ .....	444
6.5.4	Détermination de l'énergie massique nette à l'aspiration $NPSE$ .....	450
6.6	Mesurage du couple sur l'arbre .....	452
6.6.1	Généralités .....	452
6.6.2	Méthodes de mesurage du couple .....	452
6.6.3	Méthodes pour absorber ou fournir la puissance .....	453
6.6.4	Schémas de montage .....	453
6.6.5	Contrôle du système .....	458
6.6.6	Étalonnage .....	458
6.6.7	Incertitude sur la mesure du couple (pour un intervalle de confiance de 95 %) .....	459
6.7	Mesurage de la vitesse de rotation .....	460
6.7.1	Généralités .....	460
6.7.2	Méthodes de mesurage de la vitesse .....	460
6.7.3	Contrôle .....	460
6.7.4	Incertitude de mesure .....	460
6.8	Calcul et présentation des résultats d'essai .....	461
6.8.1	Généralités .....	461
6.8.2	Puissance, débit et rendement dans le domaine garanti .....	466
6.8.3	Calcul de la vitesse et du débit d'emballement stabilisé .....	479
6.9	Analyse des erreurs .....	484
6.9.1	Définitions .....	484
6.9.2	Détermination des incertitudes lors des essais sur modèle .....	486
6.10	Comparaison avec les garanties .....	490
6.10.1	Généralités .....	490
6.10.2	Courbe d'interpolation et bande d'incertitude totale .....	491
6.10.3	Puissance, débit et/ou énergie hydraulique massique et rendement dans le domaine garanti .....	492
6.10.4	Vitesse et débit d'emballement .....	496

6.10.5	Garanties de cavitation .....	497
7	Données complémentaires de fonctionnement – Méthodes de mesurage et résultats .....	499
7.1	Introduction au mesurage des données complémentaires .....	499
7.1.1	Généralités .....	499
7.1.2	Conditions d'essai et mode opératoire .....	500
7.1.3	Incertitude de mesure .....	500
7.1.4	Transposition du modèle au prototype .....	500
7.2	Grandeurs fluctuantes .....	501
7.2.1	Acquisition et traitement des données pour le mesurage des grandeurs fluctuantes .....	501
7.2.2	Fluctuations de pression .....	505
7.2.3	Fluctuations de couple sur l'arbre .....	520
7.3	Poussées axiale et radiale .....	521
7.3.1	Généralités .....	521
7.3.2	Poussée axiale hydraulique .....	522
7.3.3	Poussée radiale .....	530
7.4	Efforts hydrauliques sur les organes de réglage .....	533
7.4.1	Généralités .....	533
7.4.2	Couple sur les directrices .....	534
7.4.3	Couple sur les pales de roue .....	540
7.4.4	Force sur le pointeau et couple sur le déflecteur des turbines Pelton .....	544
7.5	Essais dans un domaine de fonctionnement élargi .....	548
7.5.1	Généralités .....	548
7.5.2	Quatre quadrants .....	548
7.5.3	Modes de fonctionnement (voir Figure 116) .....	550
7.5.4	Objet des essais .....	551
7.5.5	Modalités d'essai dans un domaine de fonctionnement élargi .....	553
7.6	Mesures de pression différentielle en vue des essais indicels du prototype .....	555
7.6.1	Généralités .....	555
7.6.2	But de l'essai .....	556
7.6.3	Exécution de l'essai .....	556
7.6.4	Analyse des résultats d'essai .....	556
7.6.5	Transposition aux conditions du prototype .....	557
7.6.6	Incertitude .....	557
Annexe A (informative)	Termes adimensionnels .....	558
Annexe B (normative)	Propriétés physiques, valeurs numériques .....	560
Annexe C (informative)	Procédure résumée d'essai et de calcul .....	568
C.1	Généralités .....	568
C.2	Accords à obtenir avant l'essai .....	568
C.3	Instrumentation de l'installation d'essai et du modèle .....	569
C.3.1	Construction du modèle et contrôles dimensionnels .....	569
C.3.2	Instrumentation de l'installation d'essai et système d'acquisition des données .....	569
C.4	Essais et calcul des grandeurs relatives au modèle .....	569
C.4.1	Types d'essais .....	569
C.4.2	Mesurage des grandeurs principales pendant les essais .....	570
C.4.3	Incertitude sur les grandeurs mesurées .....	570
C.4.4	Calcul des grandeurs liées aux performances hydrauliques principales .....	570

C.4.5	Calcul des facteurs ou coefficients adimensionnels et du nombre de Thoma .....	570
C.4.6	Détermination de $\delta_{ref}$ pour la transposition du rendement .....	571
C.4.7	Calcul du rendement et du coefficient de puissance transposés à $Re_{M^*}$ .....	571
C.4.8	Correction des valeurs mesurées sur modèle pour tenir compte de l'influence de la cavitation.....	571
C.5	Calcul des grandeurs relatives au prototype.....	571
C.6	Tracé des résultats du modèle ou du prototype.....	571
C.7	Comparaison aux garanties .....	572
C.8	Compte rendu final .....	572
C.9	Rapport d'essai final .....	572
Annexe D (normative) L'effet d'échelle sur le rendement hydraulique des machines à réaction .....		573
D.1	Fondements et hypothèses .....	573
D.2	Les formules de transposition du rendement.....	573
D.2.1	Etablissement de la formule générale pour la transposition du rendement .....	573
D.2.2	Proportion des pertes relatives transposables dans le domaine de garantie du rendement.....	574
D.2.3	Détermination de l'effet d'échelle sur le rendement du modèle.....	576
D.2.4	Détermination de la formule de transposition du rendement du modèle au prototype .....	578
Annexe E (informative) Comparaison des méthodes de transposition du rendement hydraulique des machines à réaction dans l'IEC 60193 et l'IEC 62097 .....		580
E.1	Méthode de transposition de l'IEC 60193 .....	580
E.1.1	Applications.....	580
E.1.2	Limites.....	580
E.2	Méthode de transposition de l'IEC 62097 .....	581
E.2.1	Applications.....	581
E.2.2	Limites.....	581
Annexe F (normative) Calcul des caractéristiques d'emballage du prototype en tenant compte des pertes par frottement et par ventilation du groupe .....		582
Annexe G (informative) Exemple de détermination de la meilleure courbe lisse: méthode des segments séparés.....		584
G.1	Généralités .....	584
G.2	Principe de la méthode .....	584
G.3	Choix de la largeur minimale des intervalles .....	586
G.4	Détermination des intervalles.....	586
Annexe H (informative) Exemples d'analyse des sources d'erreur et d'évaluation de l'incertitude .....		587
H.1	Généralités .....	587
H.2	Exemple d'analyse des sources d'erreur et d'évaluation des incertitudes sur la mesure d'une grandeur physique .....	587
H.2.1	Généralités.....	587
H.2.2	Erreurs survenant durant l'étalonnage .....	588
H.2.3	Erreurs survenant durant les essais.....	589
H.3	Exemple de calcul de l'incertitude due aux erreurs systématiques sur la détermination de l'énergie hydraulique massique, de la puissance mécanique à la roue et du rendement hydraulique .....	589
H.3.1	Généralités.....	589
H.3.2	Débit .....	590

H.3.3	Pression .....	590
H.3.4	Energie hydraulique massique .....	590
H.3.5	Puissance.....	591
H.3.6	Rendement hydraulique .....	591
H.4	Exemple de calcul de l'incertitude due aux erreurs systématiques sur la détermination de l'énergie massique nette à l'aspiration.....	592
H.4.1	Généralités .....	592
H.4.2	Débit .....	592
H.4.3	Pression .....	592
H.4.4	Energie massique nette à l'aspiration .....	592
Annexe I (normative)	L'effet d'échelle sur le rendement des turbines Pelton .....	594
I.1	Généralités .....	594
I.2	Conditions de similitude .....	594
I.3	Formule de transposition.....	597
Annexe J (normative)	Analyse des erreurs aléatoires lors d'un essai dans des conditions de fonctionnement constantes.....	598
J.1	Généralités .....	598
J.2	Ecart-type .....	598
J.3	Niveaux de confiance.....	599
J.4	Loi de <i>t</i> de Student.....	599
J.5	Valeur maximale admissible de l'incertitude due aux erreurs aléatoires .....	600
J.6	Exemple de calcul.....	601
Annexe K (normative)	Calcul du nombre de Thoma d'installation $\sigma_{pI}$ .....	602
K.1	Définition de $\sigma_{pI}$ , <i>NPSE</i> et <i>NPSH</i> .....	602
K.2	Données nécessaires pour le calcul de $\sigma_{pIc}$ .....	603
Annexe L (informative)	Diagramme du bilan détaillé d'énergie hydraulique massique, de débit et de puissance .....	605
Annexe M (informative)	Composantes synchrones et asynchrones des signaux de pression.....	608
Annexe N (informative)	Fréquence propre du système hydraulique .....	610
Annexe O (informative)	Calcul des composantes de la poussée axiale .....	611
O.1	Généralités .....	611
O.2	Calcul des forces s'exerçant sur le plafond de roue ( $F_2$ ) .....	611
O.2.1	Généralités .....	611
O.2.2	Perte d'énergie massique due au jeu des labyrinthes.....	611
O.2.3	Pertes d'énergie massique dans les zones de centrifugation entre parties fixes et tournantes .....	613
O.2.4	Pertes d'énergie massique dans une tuyauterie d'équilibrage .....	614
O.2.5	Pertes d'énergie massique additionnelles .....	615
O.3	Calcul des forces s'exerçant sur la ceinture de roue ( $F_3$ ).....	616
Bibliographie.....		617
Figure 1 – Représentation schématique d'une machine hydraulique .....		331
Figure 2 – Ouverture et angle du distributeur .....		331
Figure 3 – Diamètre de référence et largeur d'auget .....		333
Figure 4 – Détermination de $\sigma_0$ et $\sigma_1$ pour des courbes de cavitation typiques .....		338
Figure 5 – Niveau de référence de la machine .....		340

Figure 6 – Diagramme du bilan de puissance et de débit .....	342
Figure 7 – Illustration de quelques définitions relatives aux grandeurs fluctuantes .....	345
Figure 8 – Procédure pour le contrôle dimensionnel, la comparaison des résultats "métal à métal" et l'application des tolérances au modèle et au prototype .....	359
Figure 9 – Exemple des dimensions à contrôler sur une bâche spirale et un distributeur ....	362
Figure 10 – Exemple des dimensions à contrôler sur un aspirateur .....	362
Figure 11 – Exemple des dimensions à contrôler sur un groupe bulbe .....	363
Figure 12 – Exemple des dimensions à contrôler sur la roue d'une machine radiale.....	364
Figure 13 – Roue de machine radiale: exemples des positions des sections du profil de l'aube pour des gabarits ou des points de contrôle de MMT .....	365
Figure 14 – Roue de machine radiale: contrôle de la largeur de sortie et du profil des aubes au moyen de gabarits (exemple d'une roue de turbine Francis) .....	365
Figure 15 – Roue de machine radiale: contrôle des largeurs de sortie et d'entrée entre deux aubes (exemple d'une roue de pompe-turbine) .....	366
Figure 16 – Roue de machine axiale: exemples des positions des sections du profil de l'aube pour des gabarits ou des points de contrôle de MMT .....	366
Figure 17 – Roue de machine axiale: définition de l'ajustement des pales et de la tolérance sur leur profil .....	366
Figure 18 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à contrôler sur le distributeur et sur le bâti de machine à axe vertical et horizontal.....	367
Figure 19 – Turbine Pelton: exemple de dimensions à contrôler sur les augets et les injecteurs .....	368
Figure 20 – Définition de l'ondulation et de la rugosité de surface .....	380
Figure 21 – Exemple des valeurs de rugosité de surface maximale recommandées sur la surface de l'aube (intrados et extrados) pour une turbine de faible énergie hydraulique massive .....	381
Figure 22 – Relation entre le niveau de référence $z_r$ d'une turbine Francis et son niveau de référence de cavitation $z_c$ .....	386
Figure 23 – Variation de $\sigma$ en fonction du niveau $z$ pour le modèle et le prototype .....	386
Figure 24 – Accélération due à la pesanteur $g$ ( $m \cdot s^{-2}$ ) .....	406
Figure 25 – Masse volumique de l'eau distillée $\rho_{wd}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) .....	409
Figure 26 – Système d'acquisition par multiplexage séquentiel .....	414
Figure 27 – Système d'acquisition par bus .....	415
Figure 28 – Retard (déphasage) .....	416
Figure 29 – Exemple des caractéristiques d'atténuation d'un filtre passe-bas .....	417
Figure 30 – Différentes chaînes de mesure et localisation de points de contrôle recommandés .....	419
Figure 31 – Exemples de prises de pression .....	428
Figure 32 – Types de collecteurs de pression: a) avec lignes individuelles de raccordement au collecteur et b) avec collecteur annulaire .....	429
Figure 33 – Exemple de montage expérimental de manomètre à colonne liquide .....	431
Figure 34 – Manomètre à poids avec compensation par transducteur de pression ou de force (exemple de montage expérimental) .....	434
Figure 35 – Balance de pression (exemple de montage expérimental) .....	435
Figure 36 – Puits de tranquillisation .....	438
Figure 37 – Limnimètre à pointe ou à crochet .....	439



Figure 38 – Exemple montrant les altitudes et hauteurs principales et les niveaux de référence du banc d'essai et de la machine modèle .....	442
Figure 39 – Détermination de l'énergie hydraulique massique à l'aide d'un manomètre différentiel .....	445
Figure 40 – Détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine par mesure séparée des pressions effectives.....	446
Figure 41 – Détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine par mesure séparée des pressions à l'aide de manomètres à colonne d'eau.....	447
Figure 42 – Turbines Pelton à axe vertical: détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine .....	448
Figure 43 – Turbines Pelton à axe horizontal: détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine .....	449
Figure 44 – Machines de basse chute: détermination de l'énergie hydraulique massique de la machine à partir de niveaux libres .....	450
Figure 45 – Détermination de l'énergie massique nette à l'aspiration <i>NPSE</i> et de la hauteur de charge nette absolue à l'aspiration <i>NPSH</i> .....	451
Figure 46 – Montage en balance.....	454
Figure 47 – Montage en balance avec renvoi d'angle.....	455
Figure 48 – Montage en balance avec deux châssis séparés .....	455
Figure 49 – Montage avec les paliers de la machine et les joints non en balance.....	455
Figure 50 – Montage avec palier inférieur et joint non en balance .....	456
Figure 51 – Montage avec palier intermédiaire et joint non en balance .....	456
Figure 52 – Montage utilisant un couplemètre.....	456
Figure 53 – Montage utilisant un couplemètre avec les paliers de la machine et les joints en balance.....	457
Figure 54 – Montage utilisant un couplemètre avec les paliers de la machine et les joints non en balance .....	457
Figure 55 – Choix de la méthode de transposition appropriée .....	461
Figure 56 – Modèle de turbine à simple réglage (Francis): diagramme en colline (facteur de débit en fonction du facteur de vitesse).....	463
Figure 57 – Modèle de turbine à simple réglage (Francis): diagramme en colline (coefficient d'énergie en fonction du coefficient de débit).....	463
Figure 58 – Modèle de turbine à double réglage (Kaplan): diagramme en colline .....	464
Figure 59 – Modèle de pompe à simple réglage (radiale): diagramme de performances.....	464
Figure 60 – Modèle de pompe à double réglage: diagramme de performances .....	465
Figure 61 – Modèle de turbine Pelton: diagramme en colline (exemple d'une machine à six injecteurs) .....	465
Figure 62 – Modèle de pompe-turbine radiale: diagramme général des quatre quadrants .....	466
Figure 63 – Machine à réaction: procédure pour calculer les résultats d'essai en vue de les comparer aux performances garanties.....	467
Figure 64 – Turbine à simple réglage: surface tridimensionnelle du rendement hydraulique et courbes caractéristiques à $E_{nD}$ constant .....	469
Figure 65 – Pompe à simple réglage: courbes caractéristiques .....	470
Figure 66 – Turbine à double réglage: courbes caractéristiques à $E_{nD}$ constant.....	471
Figure 67 – Pompe à double réglage: courbes caractéristiques à $E_{nD}$ constant.....	472
Figure 68 – Turbine non réglable: courbes caractéristiques .....	473

Figure 69 – Pompe non réglable: courbes caractéristiques .....	474
Figure 70 – Correction de la courbe de rendement pour prendre en compte l'influence de la cavitation (par exemple machines tubulaires en surcharge).....	475
Figure 71 – Modèle de turbine Francis: courbes de cavitation .....	475
Figure 72 – Modèle de pompe: courbes de cavitation.....	475
Figure 73 – Courbes de cavitation d'une modèle de turbine Francis: exemples de limites d'application de la formule de transposition .....	477
Figure 74 – Courbes d'emballement d'une turbine à simple réglage (Francis) .....	480
Figure 75 – Courbes d'emballement d'une turbine à simple réglage (Pelton à six jets) .....	480
Figure 76 – Détermination de la vitesse d'emballement par extrapolation: exemple d'une turbine à simple réglage (Francis) .....	480
Figure 77 – Influence du nombre de Thoma sur la vitesse et le débit d'emballement d'une turbine à simple réglage (Francis) .....	481
Figure 78 – Influence du nombre de Thoma sur la vitesse et le débit d'emballement d'une turbine à double réglage (Kaplan).....	482
Figure 79 – Influence du nombre de Thoma sur les courbes d'emballement hors conjugaison d'une turbine à double réglage (Kaplan) .....	482
Figure 80 – Exemple de courbe d'étalonnage.....	486
Figure 81 – Machine à simple réglage.....	492
Figure 82 – Machine à double réglage .....	492
Figure 83 – Turbine à simple réglage: comparaison entre garanties et résultats de mesure .....	493
Figure 84 – Turbine non réglable: comparaison entre garanties et résultats de mesure .....	494
Figure 85 – Pompe non réglable: comparaison entre garanties et résultats de mesure .....	495
Figure 86 – Courbes de vitesse et de débit d'emballement d'une turbine Francis: comparaison entre garanties et résultats de mesure .....	497
Figure 87 – Turbine modèle: courbe de cavitation et comparaison avec la garantie portant sur l'influence de la cavitation sur le rendement.....	498
Figure 88 – Système typique d'acquisition de données .....	502
Figure 89 – Réponse en fréquence d'un filtre analogique anti-repliement.....	503
Figure 90 – Emplacements suggérés pour les transducteurs.....	508
Figure 91 – Zones d'exploration dans un diagramme de pompe .....	510
Figure 92 – Zones d'exploration dans une colline de turbine .....	511
Figure 93 – Fonctionnement normal en mode pompe d'un modèle de pompe-turbine de $n_{QE} = 0,102$ .....	513
Figure 94 – Fonctionnement à débit nul (10 % d'ouverture des aubes directrices) d'un modèle de pompe-turbine de $n_{QE} = 0,102$ .....	513
Figure 95 – Fonctionnement à charge partielle d'un modèle de turbine Francis de $n_{QE} = 0,321$ : $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 0,719$ .....	514
Figure 96 – Fonctionnement à charge partielle élevée d'un modèle de turbine Francis de $n_{QE} = 0,226$ : $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 0,764$ .....	514
Figure 97 – Fonctionnement à pleine charge d'un modèle de turbine Francis de $n_{QE} = 0,173$ : $Q_{nD}/Q_{nDopt} = 1,218$ .....	515
Figure 98 – Exemple d'un diagramme en cascade des fluctuations de pression dans le diffuseur d'une turbine Francis, transducteur $p_1$ .....	516

Figure 99 – Exemple de diagramme résumé des fluctuations de pression dans le diffuseur d'une turbine Francis, transducteur $p_2$ .....	517
Figure 100 – Interaction du système extérieur avec les sources de fluctuations de pression de la machine hydraulique .....	518
Figure 101 – Définition du système de coordonnées .....	521
Figure 102 – Les diverses composantes de la force axiale pour une machine radiale .....	523
Figure 103 – Dispositif d'essai typique pour le mesurage de la poussée axiale .....	525
Figure 104 – Dispositif d'étalonnage typique pour le mesurage de la poussée axiale .....	526
Figure 105 – Facteur de force axiale en fonction du facteur de débit pour différentes énergies hydrauliques spécifiques constantes en mode pompe.....	528
Figure 106 – Facteur de force axiale en fonction du facteur de vitesse mesuré pour différentes ouvertures du distributeur dans les quatre quadrants pour une pompe-turbine .....	528
Figure 107 – Dispositifs typiques pour le mesurage de la poussée axiale (arbre horizontal ou vertical) .....	531
Figure 108 – Exemples de conception de directrices instrumentées pour la mesure du couple.....	535
Figure 109 – Facteur de couple sur les directrices en fonction de l'angle du distributeur, mesuré en mode turbine à différentes énergies hydrauliques massiques .....	537
Figure 110 – Facteur de couple sur les directrices en fonction de l'angle du distributeur, mesuré en mode pompe à différentes énergies hydrauliques massiques .....	538
Figure 111 – Facteur de couple sur les directrices en fonction du facteur de vitesse mesuré pour différents angles du distributeur dans les quatre quadrants d'une pompe-turbine .....	538
Figure 112 – Exemple d'un dispositif de mesure du couple sur les pales avec transmission télémétrique .....	541
Figure 113 – Caractéristiques de fonctionnement et de couple hydraulique sur les pales d'une turbine axiale, mesurées à angle de pales $\beta$ constant et pour différents angles $\alpha$ des directrices.....	543
Figure 114 – Facteur de force sur le pointeau d'une turbine Pelton en fonction de la course relative du pointeau.....	547
Figure 115 – Exemple de diagramme des quatre quadrants pour une pompe-turbine radiale .....	549
Figure 116 – Diagramme des différents modes de fonctionnement.....	551
Figure 117 – Caractéristique en S dans le mode turbine-frein .....	554
Figure 118 – Caractéristique en pompe avec un domaine de pente positive dans une plage limitée de débit.....	554
Figure 119 – Exemple de représentation graphique des résultats d'essai indiciel.....	557
Figure D.1 – Variation de rendement dans des conditions de fonctionnement hydrauliquement semblables avec des valeurs de $Re$ différentes pour A et B .....	574
Figure D.2 – Variation des pertes relatives transposables.....	575
Figure D.3 – Courbe de transposition au point de meilleur rendement.....	577
Figure D.4 – Majoration du rendement de $Re_M^*$ constant à $Re_p$ constant.....	578
Figure D.5 – Majoration du rendement de $Re_M$ variable à $Re_p$ constant.....	579
Figure F.1 – Turbine à simple réglage: détermination de la vitesse maximale d'emballage compte tenu des pertes par frottement et par ventilation du groupe.....	583
Figure G.1 – Principe de la méthode de segments séparés.....	585
Figure G.2 – Exemple de détermination des intervalles.....	585

Figure I.1 – Influence du nombre de Froude.....	596
Figure I.2 – Influence du nombre de Weber .....	596
Figure I.3 – Influence du nombre de Reynolds .....	597
Figure K.1 – Définitions pour la détermination de l'énergie hydraulique massique nette à l'aspiration, <i>NPSE</i> , et de la hauteur de charge nette absolue à l'aspiration, <i>NPSH</i> d'une machine prototype ( $E_{LS} \neq 0$ ) .....	602
Figure L.1 – Turbine .....	605
Figure L.2 – Pompe .....	606
Figure M.1 – a) Représentation de la pulsation de pression asynchrone et position des transducteurs de pression, et composantes synchrones b) et asynchrone c) du signal de pression.....	609
Figure O.1 – Exemple de labyrinthe de roue au plafond .....	613
Figure O.2 – Diamètres au plafond de roue.....	614
Figure O.3 – Tuyauterie d'équilibrage .....	615
Figure O.4 – Exemple de labyrinthe de roue en ceinture .....	616
Tableau 1 – Écarts maximaux admissibles.....	376
Tableau 2 – Rugosité de surface <i>Ra</i> maximale recommandée pour le prototype .....	381
Tableau 3 – Paramètres de similitude .....	382
Tableau 4 – Similitude requise pour les différents types d'essai sur modèle.....	384
Tableau 5 – Valeurs minimales de la taille des modèles et des paramètres d'essai.....	390
Tableau 6 – Coefficients de la formule de Herbst et Roegenar.....	408
Tableau 7 – Énergie hydraulique massique minimale .....	410
Tableau 8 – Nomenclature pour les Figure 46 à Figure 54 .....	454
Tableau 9 – Variables définissant le point de fonctionnement d'une machine.....	462
Tableau 10 – Récapitulation des erreurs qui déterminent l'incertitude totale de mesure .....	487
Tableau 11 – Définitions des forces élémentaires individuelles de la poussée axiale .....	524
Tableau 12 – Forces non hydrauliques affectant la mesure de poussée radiale .....	532
Tableau 13 – Définition des quadrants et des modes de fonctionnement .....	549
Tableau B.1 – Accélération due à la pesanteur $g$ ( $m \cdot s^{-2}$ ).....	560
Tableau B.2 – Masse volumique de l'eau distillée $\rho_{wd}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ) (1 de 2).....	561
Tableau B.3 – Viscosité cinématique de l'eau distillée $\nu$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ).....	563
Tableau B.4 – Pression de vapeur de l'eau distillée $p_{va}$ (Pa) .....	564
Tableau B.5 – Masse volumique de l'air sec $\rho_a$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ).....	565
Tableau B.6 – Pression ambiante $p_{amb}$ (Pa) .....	566
Tableau B.7 – Masse volumique du mercure $\rho_{Hg}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ).....	567
Tableau D.1 – Valeurs de $V_{ref}$ .....	576
Tableau I.1 – Valeurs numériques de la tension superficielle $\sigma^*$ .....	595
Tableau J.1 – Niveaux de confiance .....	599
Tableau J.2 – Valeurs de $t$ de Student .....	600
Tableau J.3 – Calcul de l'écart-type estimé et de l'incertitude pour huit observations.....	601
Tableau K.1 – Présentation des valeurs de $\sigma_{plc}$ calculées et autres données .....	604

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### **TURBINES HYDRAULIQUES, POMPES D'ACCUMULATION ET POMPES-TURBINES – ESSAIS DE RÉCEPTION SUR MODÈLE**

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique 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. A 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 de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60193 a été établie par le comité d'études 4 de l'IEC comité technique 4: Turbines hydrauliques.

Cette troisième édition annule et remplace la seconde édition publiée en 1999. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) mise à jour des méthodes/appareils de mesures utilisés actuellement pour les contrôles dimensionnels sur modèle et sur prototype;
- b) mise à jour des exigences de précision pour les procédures de contrôle dimensionnels tenant compte des nouvelles technologies;

- c) fusion des tableaux/sections présentant des informations redondantes dans la section contrôles dimensionnels;
- d) mise à jour des méthodes de mesurage du débit;
- e) mise à jour des méthodes et de la terminologie relatives aux fluctuations de pression;
- f) définition des temps de mesurages pour des analyses précises des fluctuations de pression sur modèle;
- g) nouvelle définition de la transposition des fluctuations de pression au prototype;
- h) mise à jour des exigences d'ondulations de surface sur prototype;
- i) nouvelle définition des méthodes/références dans la section sur la teneur en germes de cavitation (5.7.3.2.2);
- j) mise à jour du 7.3 et révision des méthodes de mesurage de poussée radiale;
- k) mise à jour du 7.4 (Efforts hydrauliques sur les organes de réglage);
- l) mise à jour et développement de méthodologie des essais dans le domaine de fonctionnement élargi, Paragraphe 7.5;
- m) mise à jour du 7.6 concernant les essais indicieux;
- n) mise à jour des mesurages de rugosité;
- o) mise à jour des références;
- p) mise à jour des figures;
- q) révision de la définition de sigma;
- r) référence à la nouvelle méthode de transposition conformément à l'IEC 62097.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
4/371/FDIS	4/373/RVD

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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 "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

## **TURBINES HYDRAULIQUES, POMPES D'ACCUMULATION ET POMPES-TURBINES – ESSAIS DE RÉCEPTION SUR MODÈLE**

### **1 Domaine d'application**

Le présent document est applicable aux modèles de laboratoire de tout type de turbine hydraulique à action ou à réaction, de pompe d'accumulation ou de pompe-turbine.

Il s'applique aux modèles de machines prototypes ayant une puissance unitaire supérieure à 5 MW ou un diamètre de référence supérieur à 3 m. Bien que l'application intégrale des procédures prescrites ne soit généralement pas justifiée pour des machines de puissance et de dimension inférieures, le présent document peut néanmoins être utilisé pour de telles machines après accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Dans ce document, le terme "turbine" inclut une pompe-turbine fonctionnant en turbine et le terme "pompe" inclut une pompe-turbine fonctionnant en pompe.

Ce document exclut tous les sujets à caractère purement commercial, excepté ceux intimement liés à la bonne conduite des essais.

Ce document ne concerne ni les détails de construction des machines, ni les propriétés mécaniques de leurs différentes parties pour autant que ces éléments n'affectent pas le fonctionnement du modèle ni la relation entre les performances du modèle et celles du prototype.

Le présent document régit les modalités des essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines en vue de déterminer si les garanties contractuelles de performances hydrauliques principales (voir 4.2) sont respectées.

Il fixe les règles qui gouvernent la conduite de ces essais et prescrit les mesures à prendre en cas de contestation d'une phase quelconque des essais.

Les objectifs principaux du présent document sont:

- de définir les termes et les grandeurs utilisés;
- de prescrire les méthodes d'essai et les façons de mesurer les grandeurs permettant d'évaluer les performances hydrauliques du modèle;
- de prescrire les méthodes de calcul des résultats et de comparaison aux garanties;
- de déterminer si les garanties contractuelles qui sont du domaine de ce document sont respectées;
- de définir l'étendue, le contenu et la présentation du rapport final.

Les garanties peuvent être données de l'une des façons suivantes:

- garanties reposant sur les performances hydrauliques du prototype, calculées à partir des résultats d'essai du modèle en tenant compte des effets d'échelle;
- garanties reposant sur les performances hydrauliques du modèle.



Par ailleurs des données complémentaires de fonctionnement (voir 4.4) peuvent être nécessaires pour la conception ou l'exploitation de la machine hydraulique prototype. Contrairement aux exigences indiquées aux Articles 4 à 6 relatives aux performances hydrauliques principales, les informations sur ces données complémentaires décrites à l'Article 7 ne sont considérées que comme des recommandations ou des conseils à l'utilisateur (voir 7.1).

Il est particulièrement recommandé d'effectuer les essais de réception sur modèle lorsque les conditions pratiques dans lesquelles seraient faits des essais de réception sur le site (voir l'IEC 60041) ne permettraient pas de prouver le respect des garanties données pour le prototype.

Une méthode de transposition tenant compte de la rugosité des surfaces entre le modèle et le prototype pour les pompes-turbines, les turbines Francis et les turbines axiales est décrite dans l'IEC 62097. Cette méthode requiert les valeurs de rugosité des surfaces modèle et prototype, respectivement et tient compte du décalage en  $n_{ED}$ ,  $Q_{ED}$  et  $P_{ED}$  afin de calculer la transposition entre le modèle et le prototype. Par contre, cette nouvelle méthode de calcul de transposition n'a pas été complètement validée en raison d'un manque de données pour les turbines Francis avec bêche fronto-spirale et les turbines axiales. De plus, l'IEC 62097 ne s'applique pas aux pompes d'accumulation, aux turbines Pelton et Dériaz. Les procédures de transposition de rendement décrites à l'Annexe D et l'Annexe I peuvent être donc appliquées, pour ces types de machines et dans le cas où, d'un commun accord, des conditions d'écoulement hydrauliquement lisse sont admises sur modèle et prototype, respectivement. Les limites d'application de chacune des méthodes de transposition décrites dans le présent document et l'IEC 62097 sont définies dans l'Annexe E.

La méthode de transposition des performances entre le modèle et le prototype doit être clairement définie dans les documents contractuels.

Le présent document peut aussi s'appliquer aux essais sur modèle effectués à d'autres fins, par exemple des essais comparatifs ou des travaux de recherche et développement.

Lorsque des essais de réception sur modèle ont été réalisés, les essais sur place peuvent se réduire à des essais indiciaires (voir l'IEC 60041:1991).

S'il apparaît une contradiction entre ce document et d'autres documents, les dispositions du présent document prévalent.

## 2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte 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).

IEC 62097:2009, *Machines hydrauliques, radiales et axiales – Méthode de conversion des performances du modèle au prototype*

ISO 2186:2007, *Débit des fluides dans les conduites fermées – Liaisons pour la transmission du signal de pression entre les éléments primaires et secondaires*

ISO 2533:1975, *Atmosphère-type*

ISO 4185:1980, *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par pesée*

ISO 4287:1997, *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface: Méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface*



ISO 8316:1987, *Mesure de débit des liquides dans les conduites fermées – Méthode par jaugeage d'un réservoir volumétrique*