



INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones –
Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones**

**Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones –
Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8322-8039-3

**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.....	7
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	10
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	11
4 Symbols and abbreviated terms.....	16
5 General procedures for calibration.....	17
5.1 General alibration requirements	17
5.1.1 Types of calibration	17
5.1.2 Acoustic field requirements.....	18
5.2 Acoustic free-field requirements.....	18
5.2.1 Continuous signals	18
5.2.2 Time-limited signals.....	18
5.3 Acoustic far-field requirements.....	18
5.4 Requirements for steady-state conditions.....	19
5.5 Equipment requirements	20
5.5.1 Calibration facility	20
5.5.2 Instrumentation.....	20
5.6 Positioning and alignment	22
5.6.1 Coordinate system.....	22
5.6.2 Reference direction	22
5.6.3 Transducer mounting and support.....	22
5.6.4 Alignment	23
5.6.5 Separation distance	23
5.7 Representation of the frequency response	23
5.8 Frequency limitations	24
5.8.1 High-frequency limit.....	24
5.8.2 Low-frequency limit.....	24
5.9 Checks for acoustic interference	24
6 Electrical measurements.....	25
6.1 Signal type.....	25
6.2 Electrical earthing.....	25
6.3 Measurement of hydrophone output voltage.....	25
6.3.1 General	25
6.3.2 Signal analysis	26
6.3.3 Electrical loading by measuring instruments	26
6.3.4 Electrical loading by extension cables	26
6.3.5 Electrical noise	26
6.3.6 Cross-talk	27
6.3.7 Integral preamplifiers	27
6.4 Measurement of projector drive current.....	27
6.4.1 Instrumentation.....	27
6.4.2 Signal analysis	27
6.5 Measurement of projector drive voltage	28
6.5.1 Instrumentation.....	28
6.5.2 Signal analysis	28

7	Preparation and conditioning of transducers	28
7.1	Soaking	28
7.2	Wetting	28
7.3	Extending the hydrophone cable	29
7.4	Environmental conditions (temperature and depth)	29
8	Free-field three-transducer spherical-wave reciprocity calibration	29
8.1	General principle	29
8.2	Calibration to determine sensitivity modulus (without phase).....	30
8.2.1	Acoustic field requirements.....	30
8.2.2	Separation distance	30
8.2.3	Transducer preparation, mounting and alignment	31
8.2.4	Signal type	31
8.2.5	Measurement of electrical transfer impedance	31
8.2.6	Calculation of the receive sensitivities	31
8.2.7	Calculation of the transmit sensitivities	32
8.2.8	Repeatability	32
8.2.9	Verification and checks.....	32
8.2.10	Uncertainty	34
8.3	Calibration to determine phase of the hydrophone sensitivity	34
8.3.1	General principle	34
8.3.2	Transducer preparation	35
8.3.3	Acoustic field requirements.....	36
8.3.4	Signal type	36
8.3.5	Transducer mounting and alignment	36
8.3.6	Measurement of electrical transfer impedance	36
8.3.7	Calculation of sensitivity phase angle	36
8.3.8	Repeatability	37
8.3.9	Verification and checking.....	37
8.3.10	Uncertainty	37
9	Free-field calibration by comparison with an acoustic reference device.....	37
9.1	Principles.....	37
9.2	Types of comparison calibration method	38
9.2.1	Hydrophone calibration using a calibrated reference hydrophone	38
9.2.2	Hydrophone calibration using calibrated reference projector	38
9.2.3	Projector calibration using a calibrated reference hydrophone	38
9.3	Hydrophone calibration by comparison with a reference hydrophone	38
9.3.1	Acoustic field requirements.....	38
9.3.2	Separation distance	38
9.3.3	Transducer preparation, mounting and alignment	39
9.3.4	Signal type	39
9.3.5	Measurement of electrical voltage	39
9.3.6	Free-field sensitivity	39
9.3.7	Repeatability	39
9.3.8	Verification and checks.....	40
9.3.9	Uncertainty	40
9.4	Hydrophone calibration using a calibrated projector	40
9.4.1	Acoustic field requirements.....	40
9.4.2	Separation distance	40
9.4.3	Transducer preparation, mounting and alignment	41

9.4.4	Signal type	41
9.4.5	Measurement of electrical transfer impedance	41
9.4.6	Calculation of the receive sensitivities	41
9.4.7	Repeatability	41
9.4.8	Verification and checks	42
9.4.9	Uncertainty	42
9.5	Projector calibration using a calibrated hydrophone	42
9.5.1	Acoustic field requirements	42
9.5.2	Separation distance	42
9.5.3	Transducer preparation, mounting and alignment	42
9.5.4	Signal type	43
9.5.5	Measurement of electrical transfer impedance	43
9.5.6	Calculation of the transmit sensitivity	43
9.5.7	Verification and checks	43
9.5.8	Uncertainty	44
10	Reporting of results	44
10.1	Sensitivity	44
10.2	Sensitivity level	44
10.3	Calibration uncertainties	45
10.4	Auxiliary metadata	45
11	Recalibration periods	45
Annex A	(informative) Directional response of a hydrophone or projector	46
A.1	General principle	46
A.2	Types of measurement implementation	46
A.3	Coordinate system	46
A.4	Acoustic field requirements	47
A.5	Positioning and alignment	47
A.6	Signal type	47
A.7	Measurement of transducer directional response	47
A.7.1	Projector	47
A.7.2	Hydrophone	47
A.8	Calculation of the directional response level (angular deviation loss)	47
A.9	Uncertainty	48
A.10	Graphic representation	48
A.11	Directivity factor	49
A.12	Directivity index	49
Annex B	(informative) Measurement of electrical impedance of hydrophones and projectors	50
B.1	General principles	50
B.2	Measurement of electrical impedance	50
B.3	Derivation of other electrical impedance parameters	51
B.4	Graphical representation	52
Annex C	(informative) Calculation of electrical loading corrections	54
C.1	Electrical loading corrections	54
C.2	Corrections for amplifier loading using complex electrical impedance	54
C.3	Corrections for loading caused by extension cables (using complex electrical impedance)	54
C.4	Corrections using only capacitances	55
Annex D	(informative) Acoustic far-field criteria in underwater acoustic calibration	56

D.1	General.....	56
D.2	The field for piston transducers.....	56
D.3	Criteria for far-field conditions.....	57
D.4	Far-field criteria in directional response measurements.....	58
Annex E (informative) Pulsed techniques in free-field calibrations.....		59
E.1	General.....	59
E.2	Echo-free time.....	59
E.3	Minimum separation distance.....	61
E.4	Turn-on transients.....	61
E.5	Bandwidth considerations.....	62
E.6	Electrical cross-talk.....	63
E.7	Pulse duration.....	63
E.8	Reverberation and pulse repetition rate.....	63
E.9	Typical tank dimensions.....	63
E.10	Spherical-wave conditions.....	64
E.11	Reflections from mounting poles and rigging.....	64
E.12	Analysis methods for tone-burst signals.....	64
E.13	High-frequency limitations.....	65
E.14	Low-frequency limitations.....	66
E.15	Advanced techniques for extending the frequency range beyond the low-frequency limit.....	67
Annex F (informative) Assessment of uncertainty in the calibration of hydrophones and projectors.....		69
F.1	General.....	69
F.2	Type A evaluation of uncertainty.....	69
F.3	Type B evaluation of uncertainty.....	69
F.4	Reported uncertainty.....	69
F.5	Common sources of uncertainty.....	70
Annex G (informative) Derivation of the formulae for three-transducer spherical-wave reciprocity calibration.....		72
G.1	General.....	72
G.2	Calibration to determine the modulus of the sensitivity.....	72
G.3	Calibration to determine the complex sensitivity.....	74
Annex H (informative) Calibration using travelling-wave tubes.....		77
H.1	General.....	77
H.2	Calibration procedure.....	77
H.3	Limitations of the method.....	77
H.4	Extensions of the method.....	78
Annex I (informative) Calibration of hydrophones using optical interferometry.....		79
I.1	General.....	79
I.2	General principles.....	79
I.3	Procedure.....	79
I.4	Discussion of method.....	80
Annex J (informative) Calibration in a reverberant water tanks using continuous signals.....		81
J.1	General principle.....	81
J.2	Using a noise signal.....	82
J.3	Using the LFM signal.....	82
J.4	Uncertainties.....	83

Bibliography.....	84
Figure 1 – Measurement configurations for three-transducer reciprocity.....	30
Figure 2 – Measurement framework for supporting in-line the three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated.....	35
Figure A.1 – Examples of graphical representations of the level of the directional response: polar plot (left) and Cartesian plot (right)	48
Figure B.1 – Examples of plots of transducer electrical impedance for a small spherical hydrophone of capacitance 3 nF	53
Figure D.1 – Acoustic pressure as a function of range from the source for a point source and for a piston source of dimensions $ka = 10$	56
Figure D.2 – Difference in measured acoustic pressure on axis compared to spherical spreading measured by a point receiver and a piston receiver	57
Figure E.1 – Schematic diagram of a projector and receiver in a water tank showing the main sources of reflections	60
Figure E.2 – Echo arrival time in a 6 m × 6 m × 5 m tank with optimally placed transducers.....	61
Figure E.3 – Hydrophone signals for a pair of spherical transducers (projector: 18 kHz resonance frequency, Q-factor of 3,5; hydrophone: 350 kHz resonance frequency; drive frequency: 2 kHz (left) and 18 kHz (right)).....	62
Figure E.4 – Examples of acoustic waveforms showing time-windows for analysis	65
Figure E.5 – Values for the sound absorption in pure water and sea water, including contributions due to component factors.....	66
Figure I.1 – Configurations for calibration of hydrophones using heterodyne optical interferometry	80

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES – CALIBRATION OF HYDROPHONES –

Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones

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 60565-1 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics.

This first edition of IEC 60565-1, together with IEC 60565-2, cancels and replaces the second edition of IEC 60565 published in 2006. This edition constitutes a technical revision.

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

- 1) removal of all descriptions of methods for pressure calibrations of hydrophones – these are now included in Part 2;
- 2) removal of the derivations of formulae for free-field reciprocity calibration (both amplitude sensitivity and phase sensitivity) and placement of these into an informative annex;
- 3) inclusion within the scope of the calibration of the transmitting response of individual source **transducers** and hydrophones (but not sonar arrays);
- 4) re-ordering of the sections within the document such that the more general procedures for calibration such as guidance on obtaining conditions of acoustic free-field, far-field, and

steady-state, appear before the descriptions of procedures for absolute or relative calibrations;

- 5) revision of informative Annex A to include guidance on measurement of directional response of a hydrophone or projector;
- 6) addition of a new informative Annex B on measurement of electrical impedance of hydrophones and projectors;
- 7) revision of the previous informative annex on electrical loading corrections to include corrections to account for electrical loading by added cables (now Annex C);
- 8) addition of a new informative Annex D on acoustic far-field criteria in underwater acoustic calibration;
- 9) revision of the previous informative annex on pulsed techniques in free-field calibrations (now Annex E);
- 10) revision of the previous informative annex on assessment of uncertainty in the calibration of hydrophones (now Annex F);
- 11) deletion of the previous informative annex on equivalent circuit of the excitation system for calibration with a vibrating column;
- 12) addition of a new informative Annex G on derivation of the formulae for three-**transducer** spherical-wave reciprocity calibration;
- 13) addition of a new informative Annex H on calibration using travelling-wave tubes;
- 14) addition of a new informative Annex I on calibration of hydrophones using optical interferometry.
- 15) addition of a new informative Annex J on calibration in reverberant water tanks using continuous **signals**.

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

CDV	Report on voting
87/708/CDV	87/736/RVC

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.

NOTE Words that appear in **bold** in the text are terms explicitly defined in Clause 3.

A list of all parts in the IEC 60565 series, published under the general title *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones*, can be found on the IEC website.

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.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Underwater acoustic measurements are made to provide validation and qualification in a wide range of ocean applications, including oceanography, defence, fisheries, geophysics and in developments in the off-shore energy industries. In addition, the increasing concern about the effect of anthropogenic sound on the marine environment has led to regulation which requires absolute acoustic measurement of the sound radiated by specific sources, and of the ambient sound field.

To be meaningful, it is important that measurements be performed in a technically sound manner, be related to common standards of measurement, and be made using calibrated sensors. **Hydrophones** are the most commonly-used sensor to measure sound in the ocean. It is important that the **hydrophones** used to measure sound pressure are calibrated using agreed standard methodologies, with valid uncertainties.

The purpose of this document is to establish procedures for calibration under free-field conditions of **hydrophones** used in underwater acoustics for ocean applications. Also covered are calibration procedures for individual underwater **electroacoustic transducers** which can be used as a **hydrophone** and/or source **transducer**. Principles, procedures, and sources of uncertainty are also provided in this document. The calibration methods described include absolute methods which do not require an acoustic reference **transducer**, and relative methods which make use of a calibrated acoustic reference **hydrophone** or **projector**. The methods described cover the frequency range from 200 Hz to 1 MHz.

UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES – CALIBRATION OF HYDROPHONES –

Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones

1 Scope

This part of IEC 60565 specifies methods and procedures for free-field calibration of **hydrophones**, as well as individual **electroacoustic transducers** that can be used as **hydrophones** (receivers) and/or **projectors** (source **transducers**). Two general types of calibration are covered within this document: absolute calibration using the method of three-**transducer** spherical-wave reciprocity, and relative calibration by comparison with a reference device which has already been the subject of an absolute calibration.

The maximum frequency range of the methods specified in this document is from 200 Hz to 1 MHz. The lowest acoustic frequency of application will depend on a number of factors, and will typically be in the range 200 Hz to 5 kHz depending mainly on the dimensions of the chosen test facility, The highest frequency of application for the methods described here is 1 MHz.

Procedures for pressure **hydrophone** calibration at low frequencies can be found in IEC 60565-2 [1]¹. Procedures for **hydrophone** calibration at acoustic frequencies greater than 1 MHz are covered by IEC 62127-2 [2].

Excluded from the scope of this document are low-frequency pressure calibrations of **hydrophones**, which are described in IEC 60565-2 [1]. Also excluded are calibrations of digital **hydrophones** and systems, calibration of marine autonomous acoustic recorders, calibration of acoustic vector sensors such as particle velocity sensors and pressure gradient **hydrophones**, calibration of passive sonar arrays consisting of multiple **hydrophones**, and calibration of active sonar arrays consisting of projectors and **hydrophones**.

This document presents a description of the requirements for free-field calibration in terms of test facility, equipment and instrumentation, **signal** processing, and frequency limitations. A description of achievable uncertainty and rules for the presentation of the calibration data are provided. Also included are informative annexes that provide additional guidance on

- measurement of directional response of a **hydrophone** or projector,
- measurement of electrical impedance of **hydrophones** and projectors,
- electrical loading corrections,
- **acoustic far-field** criteria in underwater acoustic calibration,
- pulsed techniques in free-field calibrations,
- assessment of uncertainty in the free-field calibration of **hydrophones** and projectors,
- derivation of the formulae for three-**transducer** spherical-wave reciprocity calibrations,
- calibration using travelling-wave tubes,
- calibration of **hydrophones** using optical interferometry, and
- calibrations in reverberant water tanks using continuous **signals**.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

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 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics* (available at <http://www.electropedia.org/>)

IEC 60500:2017, *Underwater acoustics – Hydrophones – Properties of the hydrophone in the frequency range 1 Hz to 500 kHz*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	95
1 Domaine d'application	99
2 Références normatives	100
3 Termes et définitions	100
4 Symboles et abréviations	105
5 Procédures générales d'étalonnage	107
5.1 Exigences générales d'étalonnage	107
5.1.1 Types d'étalonnages	107
5.1.2 Exigences du champ acoustique	107
5.2 Exigences du champ acoustique libre	107
5.2.1 Signaux continus	107
5.2.2 Signaux limités dans le temps	108
5.3 Exigences du champ acoustique lointain	108
5.4 Exigences relatives aux conditions en régime établi	109
5.5 Exigences relatives au matériel	109
5.5.1 Installation d'étalonnage	109
5.5.2 Instruments	110
5.6 Positionnement et alignement	112
5.6.1 Système de coordonnées	112
5.6.2 Direction de référence	112
5.6.3 Montage et support du transducteur	112
5.6.4 Alignement	113
5.6.5 Distance de séparation	113
5.7 Représentation de la réponse en fréquence	113
5.8 Limites de fréquence	114
5.8.1 Limite de haute fréquence	114
5.8.2 Limite de basse fréquence	114
5.9 Contrôles des interférences acoustiques	115
6 Mesurages électriques	115
6.1 Forme du signal	115
6.2 Mise à la terre électrique	115
6.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone	115
6.3.1 Généralités	115
6.3.2 Analyse du signal	116
6.3.3 Charge électrique par les appareils de mesure	116
6.3.4 Charge électrique par les câbles prolongateurs	116
6.3.5 Bruit électrique	117
6.3.6 Diaphonie	117
6.3.7 Préamplificateurs intégrés	117
6.4 Mesurage du courant d'attaque du projecteur	117
6.4.1 Instruments	117
6.4.2 Analyse du signal	118
6.5 Mesurage de la tension d'attaque du projecteur	118
6.5.1 Instruments	118
6.5.2 Analyse du signal	118
7 Préparation et conditionnement des transducteurs	118

7.1	Trempage	118
7.2	Mouillage	119
7.3	Prolongation du câble de l'hydrophone.....	119
7.4	Conditions d'environnement (température et profondeur)	119
8	Étalonnage par réciprocité d'onde sphérique en champ libre à trois transducteurs.....	120
8.1	Principe général.....	120
8.2	Étalonnage pour déterminer le module de sensibilité (sans phase)	121
8.2.1	Exigences du champ acoustique.....	121
8.2.2	Distance de séparation	121
8.2.3	Préparation, montage et alignement du transducteur	121
8.2.4	Forme du signal.....	121
8.2.5	Mesurage de l'impédance électrique de transfert	121
8.2.6	Calcul des sensibilités de réception	122
8.2.7	Calcul des sensibilités d'émission	122
8.2.8	Répétabilité	123
8.2.9	Vérification et contrôles	123
8.2.10	Incertitude	125
8.3	Étalonnage pour déterminer la phase de la sensibilité de l'hydrophone	125
8.3.1	Principe général	125
8.3.2	Préparation du transducteur	126
8.3.3	Exigences du champ acoustique.....	126
8.3.4	Forme du signal.....	126
8.3.5	Montage et alignement du transducteur	126
8.3.6	Mesurage de l'impédance électrique de transfert	126
8.3.7	Calcul de l'angle de phase de la sensibilité.....	127
8.3.8	Répétabilité	127
8.3.9	Vérification et contrôle	128
8.3.10	Incertitude	128
9	Étalonnage en champ libre par comparaison avec un dispositif acoustique de référence.....	128
9.1	Principes.....	128
9.2	Types de méthodes d'étalonnage par comparaison	128
9.2.1	Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un hydrophone de référence étalonné	128
9.2.2	Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un projecteur de référence étalonné	129
9.2.3	Étalonnage du projecteur à l'aide d'un hydrophone de référence étalonné	129
9.3	Étalonnage de l'hydrophone par comparaison avec un hydrophone de référence	129
9.3.1	Exigences du champ acoustique.....	129
9.3.2	Distance de séparation	129
9.3.3	Préparation, montage et alignement du transducteur	129
9.3.4	Forme du signal.....	129
9.3.5	Mesurage de la tension électrique	130
9.3.6	Sensibilité en champ libre.....	130
9.3.7	Répétabilité	130
9.3.8	Vérification et contrôles	130
9.3.9	Incertitude	131
9.4	Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un projecteur étalonné	131

9.4.1	Exigences du champ acoustique	131
9.4.2	Distance de séparation	131
9.4.3	Préparation, montage et alignement du transducteur	131
9.4.4	Forme du signal	132
9.4.5	Mesurage de l'impédance électrique de transfert	132
9.4.6	Calcul des sensibilités de réception	132
9.4.7	Répétabilité	132
9.4.8	Vérification et contrôles	133
9.4.9	Incertitude	133
9.5	Étalonnage du projecteur à l'aide d'un hydrophone étalonné	133
9.5.1	Exigences du champ acoustique	133
9.5.2	Distance de séparation	133
9.5.3	Préparation, montage et alignement du transducteur	134
9.5.4	Forme du signal	134
9.5.5	Mesurage de l'impédance électrique de transfert	134
9.5.6	Calcul de la sensibilité d'émission	134
9.5.7	Vérification et contrôles	134
9.5.8	Incertitude	135
10	Consignation des résultats	135
10.1	Sensibilité	135
10.2	Niveau de sensibilité	136
10.3	Incertitudes d'étalonnage	136
10.4	Métadonnées auxiliaires	136
11	Périodes de réétalonnage	137
Annexe A (informative)	Réponse directionnelle d'un hydrophone ou d'un projecteur	138
A.1	Principe général	138
A.2	Types de mises en œuvre de mesure	138
A.3	Système de coordonnées	139
A.4	Exigences du champ acoustique	139
A.5	Positionnement et alignement	139
A.6	Forme du signal	139
A.7	Mesurage de la réponse directionnelle du transducteur	139
A.7.1	Projecteur	139
A.7.2	Hydrophone	139
A.8	Calcul du niveau de réponse directionnelle (perte de déviation angulaire)	139
A.9	Incertitude	140
A.10	Représentation graphique	140
A.11	Facteur de directivité	141
A.12	Indice de directivité	142
Annexe B (informative)	Mesurage de l'impédance électrique des hydrophones et des projecteurs	143
B.1	Principes généraux	143
B.2	Mesurage de l'impédance électrique	143
B.3	Déduction des autres paramètres d'impédance électrique	144
B.4	Représentation graphique	145
Annexe C (informative)	Calcul des corrections de la charge électrique	147
C.1	Corrections de la charge électrique	147
C.2	Corrections de la charge de l'amplificateur utilisant l'impédance électrique complexe	147

C.3	Corrections de la charge provoquée par des câbles prolongateurs (utilisant l'impédance électrique complexe)	147
C.4	Corrections utilisant uniquement des capacités	148
Annexe D (informative)	Critères de champ acoustique lointain dans l'étalonnage acoustique sous-marin	149
D.1	Généralités	149
D.2	Champ pour les transducteurs à piston	149
D.3	Critères pour les conditions de champ lointain	151
D.4	Critères de champ lointain dans les mesurages de la réponse directionnelle.....	151
Annexe E (informative)	Techniques par impulsions dans les étalonnages en champ libre 152	
E.1	Généralités	152
E.2	Temps sans écho.....	152
E.3	Distance de séparation minimale	154
E.4	Transitoires d'enclenchement.....	155
E.5	Considérations relatives à la largeur de bande.....	156
E.6	Diaphonie électrique	156
E.7	Durée de l'impulsion	156
E.8	Réverbération et fréquence de répétition des impulsions	156
E.9	Dimensions types de la cuve.....	157
E.10	Conditions d'onde sphérique	157
E.11	Réflexions depuis les mâts de montage et les assemblages	157
E.12	Méthodes d'analyse pour les signaux à salves d'impulsions.....	158
E.13	Limites de haute fréquence	159
E.14	Limites de basse fréquence	160
E.15	Techniques avancées pour le développement de la plage de fréquences au-delà de la limite de basse fréquence	160
Annexe F (informative)	Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones et des projecteurs	162
F.1	Généralités	162
F.2	Évaluation de type A de l'incertitude	162
F.3	Évaluation de type A de l'incertitude	162
F.4	Incertitude déclarée	162
F.5	Sources communes d'incertitude.....	163
Annexe G (informative)	Déduction des formules pour l'étalonnage par réciprocité d'onde sphérique à trois transducteurs.....	166
G.1	Généralités	166
G.2	Étalonnage pour déterminer le module de la sensibilité.....	166
G.3	Étalonnage pour déterminer la sensibilité complexe.....	168
Annexe H (informative)	Étalonnage à l'aide de tubes à ondes progressives	171
H.1	Généralités	171
H.2	Procédure d'étalonnage	171
H.3	Limites de la méthode.....	172
H.4	Extensions de la méthode	172
Annexe I (informative)	Étalonnage des hydrophones par interférométrie optique.....	173
I.1	Généralités	173
I.2	Principes généraux	173
I.3	Procédure	173
I.4	Présentation de la méthode	174

Annexe J (informative) Étalonnage dans une cuve d'eau réverbérée à l'aide de signaux continus	175
J.1 Principe général.....	175
J.2 Utilisation d'un signal de bruit	176
J.3 Utilisation d'un signal LFM	177
J.4 Incertitudes.....	177
Bibliographie.....	178
Figure 1 – Configurations de mesure de la réciprocité à trois transducteurs.....	120
Figure 2 – Cadre de mesure pour soutenir les trois transducteurs en ligne: un projecteur P, un transducteur réciproque T et un hydrophone H à étalonner	125
Figure A.1 – Exemples de représentations graphiques du niveau de la réponse directionnelle: enregistrement polaire (à gauche) et enregistrement cartésien (à droite)	141
Figure B.1 – Exemples de tracés de l'impédance électrique du transducteur pour un petit hydrophone sphérique de capacité 3 nF.....	146
Figure D.1 – Pression acoustique en fonction de la plage à partir de la source pour une source ponctuelle et pour une source à piston de dimensions $ka = 10$	150
Figure D.2 – Différence de pression acoustique mesurée sur l'axe comparée à la répartition sphérique mesurée par un récepteur ponctuel et un récepteur à piston.	151
Figure E.1 – Schéma d'un projecteur et d'un récepteur dans une cuve remplie d'eau présentant les sources principales de réflexions	153
Figure E.2 – Instant d'arrivée de l'écho dans une cuve de 6 m × 6 m × 5 m avec des transducteurs placés de façon optimale	154
Figure E.3 – Signaux d'hydrophones pour un couple de transducteurs sphériques (projecteur: fréquence de résonance de 18 kHz, facteur Q de 3,5; hydrophone: fréquence de résonance de 350 kHz; fréquence de fonctionnement: 2 kHz (gauche) et 18 kHz (droite)).....	155
Figure E.4 – Exemples de formes d'onde acoustiques indiquant les fenêtres de temps pour l'analyse	158
Figure E.5 – Valeurs d'absorption dans l'eau pure et dans l'eau de mer, y compris les contributions dues aux facteurs de composant.....	159
Figure I.1 – Configurations pour l'étalonnage des hydrophones par interférométrie optique hétérodyne	174

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES – ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES –

Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones

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 60565-1 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons.

Cette première édition de l'IEC 60565-1, avec l'IEC 60565-2, annule et remplace la deuxième édition de l'IEC 60565 parue en 2006. Cette édition constitue une révision technique.

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

- 1) suppression de toutes les descriptions des méthodes d'étalonnages en pression des hydrophones – elles sont désormais incluses dans la Partie 2;

- 2) suppression des dérivées de formules d'étalonnage par réciprocité en champ libre (amplitude de sensibilité et sensibilité de phase) et leur intégration dans une Annexe informative;
- 3) inclusion dans le domaine d'application de l'étalonnage de la réponse à l'émission des **transducteurs** sources individuels et des hydrophones (mais pas des réseaux sonar);
- 4) réorganisation des sections du document de manière à faire apparaître les procédures d'étalonnage les plus générales (recommandations relatives à l'obtention des conditions de champ acoustique libre, de champ lointain et de régime permanent, par exemple) avant les descriptions des procédures d'étalonnage absolu ou d'étalonnage relatif;
- 5) révision de l'Annexe A informative pour inclure des recommandations relatives au mesurage de la réponse directionnelle d'un hydrophone ou d'un projecteur;
- 6) ajout d'une nouvelle Annexe B informative relative au mesurage de l'impédance électrique des hydrophones et des projecteurs;
- 7) révision de la précédente Annexe informative relative aux corrections de la charge électrique pour inclure les corrections et tenir compte de la charge électrique des câbles ajoutés (à présent Annexe C);
- 8) ajout d'une nouvelle Annexe D informative relative aux critères de champ acoustique lointain dans le cadre d'un étalonnage acoustique sous-marin;
- 9) révision de la précédente Annexe informative relative aux techniques par impulsions dans les étalonnages en champ libre (à présent Annexe E);
- 10) révision de la précédente Annexe informative relative à l'évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones (à présent Annexe F);
- 11) suppression de la précédente Annexe informative relative au circuit équivalent du système d'excitation pour l'étalonnage avec une colonne vibrante;
- 12) ajout d'une nouvelle Annexe G informative relative à la déduction des formules pour l'étalonnage par réciprocité d'onde sphérique à trois **transducteurs**;
- 13) ajout d'une nouvelle Annexe H informative relative à l'étalonnage à l'aide de tubes à ondes progressives;
- 14) ajout d'une nouvelle Annexe I informative relative à l'étalonnage des hydrophones par interférométrie optique.
- 15) ajout d'une nouvelle Annexe J informative relative à l'étalonnage dans des cuves d'eau réverbérées à l'aide de **signaux** continus.

Le texte de cette Norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
87/708/CDV	87/736/RVC

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

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

NOTE Les termes qui apparaissent en **gras** dans le texte sont les termes explicitement définis à l'Article 3.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60565, publiées sous le titre général *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Les mesurages acoustiques sous-marins sont réalisés pour assurer la validation et l'homologation dans un large éventail d'applications marines, y compris en océanographie, en défense, dans le domaine de la pêche, la géophysique et le développement des industries énergétiques off-shore. De plus, la préoccupation croissante suscitée par les effets du son anthropogénique sur l'environnement marin a donné lieu à des réglementations qui exigent le mesurage acoustique absolu du son émis par des sources particulières et du champ acoustique ambiant.

Pour avoir un sens, il est important que les mesurages soient réalisés de manière judicieuse d'un point de vue technique, soient liés à des normes de mesure communes et soient réalisés à l'aide de capteurs étalonnés. Les **hydrophones** sont les capteurs le plus souvent utilisés pour mesurer le son dans l'océan. Il est important que les hydrophones utilisés pour mesurer la pression acoustique soient étalonnés en suivant des méthodes normalisées convenues et présentant des incertitudes valides.

Le présent document a pour objet d'établir des procédures d'étalonnage dans les conditions de champ libre des **hydrophones** utilisés en acoustique sous-marine pour les applications marines. Les procédures d'étalonnage sont également couvertes pour les **transducteurs électroacoustiques** sous-marins individuels qui peuvent être utilisés comme **hydrophone** et/ou **transducteur** source. Les principes, les procédures et les sources d'incertitude sont également indiqués dans le présent document. Les méthodes d'étalonnage décrites incluent les méthodes absolues qui n'exigent pas de **transducteur** acoustique de référence, et les méthodes relatives qui utilisent un **hydrophone** ou **projecteur** acoustique de référence étalonné. Les méthodes décrites couvrent la plage de fréquences comprises entre 200 Hz et 1 MHz.

ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES – ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES –

Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60565 spécifie les méthodes et procédures d'étalonnage en champ libre des **hydrophones**, ainsi que des **transducteurs électroacoustiques** individuels qui peuvent être utilisés comme **hydrophones** (récepteurs) et/ou **projecteurs (transducteurs sources)**. Deux grands types d'étalonnage sont couverts par le présent document: l'étalonnage absolu utilisant la méthode par réciprocité d'onde sphérique à trois **transducteurs**, et l'étalonnage relatif par comparaison avec un dispositif de référence qui a déjà fait l'objet d'un étalonnage absolu.

La plage de fréquences maximale des méthodes spécifiées dans le présent document est comprise entre 200 Hz et 1 MHz. La fréquence acoustique la plus faible de l'application dépend d'un certain nombre de facteurs, et est en général comprise entre 200 Hz et 5 kHz selon les dimensions de l'installation d'essai choisie. La fréquence la plus élevée de l'application pour les méthodes décrites ici est de 1 MHz.

Les procédures d'étalonnage de l'**hydrophone** à pression aux basses fréquences peuvent être consultées dans l'IEC 60565-2 [1]¹. Les procédures d'étalonnage de l'**hydrophone** aux fréquences acoustiques supérieures à 1 MHz sont couvertes par l'IEC 62127-2 [2].

Les étalonnages en pression basse fréquence des **hydrophones** sont exclus du domaine d'application du présent document. Ils sont décrits dans l'IEC 60565-2 [1]. Sont également exclus les étalonnages des **hydrophones** et systèmes numériques, des enregistreurs acoustiques marins autonomes, des capteurs vectoriels acoustiques (capteurs de vitesse de particules et **hydrophones** à gradient de pression, par exemple), des réseaux sonars passifs composés de plusieurs **hydrophones** et des réseaux sonars actifs composés de projecteurs et d'**hydrophones**.

Le présent document donne une description des exigences relatives à l'étalonnage en champ libre en ce qui concerne l'installation, le matériel et les appareils d'essai, le traitement du **signal** et les limites de fréquence. Une description de l'incertitude pouvant être obtenue et les règles de présentation des données d'étalonnage sont fournies. Sont également incluses des annexes informatives donnant des recommandations supplémentaires

- relatives au mesurage de la réponse directionnelle d'un **hydrophone** ou d'un projecteur,
- relatives au mesurage de l'impédance électrique des **hydrophones** et des projecteurs,
- sur les corrections de charge électrique,
- relatives aux critères de **champ acoustique lointain** dans l'étalonnage acoustique sous-marin,
- relatives aux techniques par impulsions dans les étalonnages en champ libre,
- relatives à l'évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des **hydrophones** et des projecteurs,
- sur la déduction des formules pour les étalonnages par réciprocité d'onde sphérique à trois **transducteurs**,

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

- relatives à l'étalonnage à l'aide de tubes à ondes progressives,
- relatives à l'étalonnage des **hydrophones** par interférométrie optique, et
- relatives à l'étalonnage dans des cuves d'eau réverbérées à l'aide de **signaux** continus.

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 d'éventuels amendements).

IEC 60050-801, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique* (disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>)

IEC 60500:2017, *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Propriétés des hydrophones dans la bande de fréquences de 1 Hz à 500 kHz*