

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**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

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*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-801, IEC 60500:2017 and the following apply.

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

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

3.1

acoustic far-field

sound field at a sufficient distance from a sound source in a uniform medium where the sound pressure and sound particle velocity are substantially in phase and the direct-path sound pressure amplitude, compensated for absorption loss, varies inversely with distance

Note 1 to entry: The range (distance from the source) is taken along a direct path between the source and the receiver.

Note 2 to entry: The inverse dependence on range does not imply that the source radiates equally in all directions.

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-23-30, modified – In the definition, "and the direct-path sound pressure amplitude, compensated for absorption loss, varies inversely with distance" has been added, sourced from ISO 18405:2017, 3.3.1.1.]

3.2

electrical transfer impedance

Z_{PH}

<of a transducer pair> quotient of the Fourier transform of the **hydrophone** open-circuit output voltage $\mathcal{F}(U_H(t))$ to the Fourier transform of the electrical drive current through the **projector** $\mathcal{F}(I_P(t))$, for a **transducer** pair at a specified separation distance with one used as a **hydrophone** and one as a **projector**

$$Z_{PH} = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} \quad (1)$$

Note 1 to entry: The **electrical transfer impedance** is a complex-valued parameter. The modulus of the **electrical transfer impedance** is expressed in units of ohm, Ω . The phase angle of the **electrical transfer impedance** is the argument of the **electrical transfer impedance** and represents the phase difference between the **hydrophone** voltage and the **projector** current [IEC 60050-351:2013, 351-45-45]. The unit of phase angle is the radian.

Note 2 to entry: Because the **electrical transfer impedance** depends on the field conditions, the hydrostatic pressure, water temperature and the length of the cable attached to the **transducer**, these parameters, as well as the frequency are specified.

Note 3 to entry: In a spherically-spreading sound field, the **electrical transfer impedance** of the **transducer** pair depends on the distance between the source and the receiver, with the modulus varying inversely with separation distance d and phase angle varying as $\exp(jkd)$ where j is the square root of -1 and k is the **wavenumber** (see 3.14).

3.3

underwater electroacoustic transducer

electroacoustic transducer

underwater transducer

transducer

device which transforms electrical **signals** into acoustic **signals** in water, or vice versa

Note 1 to entry: An **electroacoustic transducer** which is used as an acoustic receiver in water is called a **hydrophone**.

Note 2 to entry: An **electroacoustic transducer** which is used as an acoustic transmitter in water is called a **projector**.

3.4

free-field receive sensitivity

M_f

<of a **hydrophone**> quotient of the Fourier transform of the **hydrophone** open-circuit voltage **signal** $\mathcal{F}(U_H(t))$ to the Fourier transform of the acoustic pressure **signal** $\mathcal{F}(p(t))$, for specified frequency and specified direction of plane wave sound incident on the position of the reference centre of the **hydrophone** in the undisturbed free-field if the **hydrophone** was removed

$$\underline{M}_f = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 to entry: The **hydrophone free-field receive sensitivity** is a complex-valued parameter. The modulus of the **free-field receive sensitivity** of a **hydrophone** is expressed in units of volt per pascal, $V \cdot Pa^{-1}$. The phase angle is the argument of the sensitivity, and represents the phase difference between the **hydrophone** electrical voltage and the sound pressure. The unit of phase angle is the radian.

Note 2 to entry: The term "response" is sometimes used instead of "sensitivity".

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.15, modified – In the definition, "the root-mean-square" has been deleted, and "Fourier transform of the" has been added before "open-circuit output voltage" and "sound pressure".]

3.5

free-field receive sensitivity level

L_M

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the free-field sensitivity M_f to a reference value of sensitivity, M_{ref} , in decibels

$$L_M = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_f|}{M_{ref}} \text{ dB} \quad (3)$$

Note 1 to entry: The unit of **free-field receive sensitivity level** is the decibel, dB. The reference value of sensitivity, M_{ref} , is $1 V \cdot Pa^{-1}$ or any valid SI multiple or submultiple thereof. The most common reference value used for underwater acoustics is $1 V \cdot \mu Pa^{-1}$.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.16, modified – In the definition, "modulus of the" has been added before "free-field sensitivity".]

3.6

omnidirectionality

feature of a **transducer** response such that it is invariant to direction to within a specified tolerance

Note 1 to entry: The tolerance is specified.

Note 2 to entry: **Omnidirectionality** can be specified in a two-dimensional space in one plane only, while in three dimensions a **transducer** can be omnidirectional in all planes through the reference centre.

Note 3 to entry: As a rule, a **transducer** directional response approaches **omnidirectionality** when the **transducer** dimensions are much smaller than the acoustic wavelength.

3.7

reciprocal transducer

linear, passive, and reversible **electroacoustic transducer** such that the coupling coefficients are equal for transduction regardless of whether transduction is electrical to mechanical or vice versa

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-25-08, modified – In the definition, "in either direction" has been replaced by "regardless ... vice versa".]

3.8

reversible transducer

transducer capable of acting as a **projector** as well as a **hydrophone**

3.9

projector

underwater sound projector

electro-acoustic **transducer** that converts electrical **signals** into sound that propagates in water

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.37, modified – The term "underwater sound **projector**" has been added.]

3.10

transmitting response to current

S_1

quotient of the product of the Fourier transform of the sound pressure $\mathcal{F}(p(t))$ at a position in the **acoustic far-field** of a **projector** (compensated for absorption loss) and the distance, d , from the reference centre of the **projector**, to the Fourier transform of the electrical current through the **projector** $\mathcal{F}(I(t))$, at a specific frequency and in a specified direction, under acoustic free-field conditions in a uniform medium

$$S_1 = \frac{\mathcal{F}(p(t)d)}{\mathcal{F}(I(t))} \exp[jk(d-d_0)] \quad (4)$$

where d_0 is the reference distance, chosen to be equal to 1 m

Note 1 to entry: The **transmitting response to current** of a **projector** is a complex-valued parameter. The modulus of the **transmitting response to current** is expressed in units of pascal metre per ampere, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$. The phase angle is the argument of the transmitting response and represents the phase difference between the sound pressure at a distance d from the **projector** and the electric current. The unit of phase angle is the radian.

Note 2 to entry: The term "sensitivity" is sometimes used instead of "response".

3.11

transmitting current response level

$L_{S,I}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **transmitting response to current**, S , to a reference value of the transmitting response, $S_{I,\text{ref}}$, in decibels

$$L_{S,I} = 20 \log_{10} \frac{|S_I|}{S_{I,ref}} \text{ dB} \quad (5)$$

Note 1 to entry: The unit of **transmitting current response level** is the decibel, dB. The reference value of the transmitting response, $S_{I,ref}$, is $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Note 2 to entry: The **transmitting response to current** of a **projector** is sometimes shortened to "transmitting current response" or "TCR".

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.27, modified – In the definition, "modulus of the" has been added before "**transmitting response to current**", and "in decibels" has been added to the end. The formula has been added. Notes to entry have been combined.]

3.12 transmitting response to voltage

S_V

quotient of the product of the Fourier transform of the sound pressure $\mathcal{F}(p(t))$ at a position in the **acoustic far-field** of a **projector** (compensated for absorption loss) and the distance d from the reference centre of the **projector** to the Fourier transform of the electrical voltage across the terminals of the **projector** $\mathcal{F}(V(t))$, at a specific frequency and in a specified direction, under acoustic free-field conditions in a uniform medium

$$\underline{S}_V = \frac{\mathcal{F}(p(t))d}{\mathcal{F}(V(t))} \exp[jk(d-d_0)] \quad (6)$$

where d_0 is the reference distance chosen to be equal to 1 m

Note 1 to entry: The **transmitting response to voltage** of a **projector** is a complex-valued parameter. The modulus of the **transmitting response to voltage** is expressed in units of pascal metre per volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$. The phase angle is the argument of the transmitting response and represents the phase difference between the sound pressure at a distance d from the **projector** and the electrical current. The unit of phase angle is the radian.

Note 2 to entry: The term "sensitivity" is sometimes used instead of "response".

Note 3 to entry: The **transmitting response to voltage** of a **projector** is sometimes shortened to "transmitting voltage response" or "TVR".

3.13 transmitting voltage response level

$L_{S,V}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **transmitting response to voltage**, S_V , to a reference value of the transmitting response, S_{ref} , in decibels

$$L_{S,V} = 20 \log_{10} \frac{|S_V|}{S_{ref}} \text{ dB} \quad (7)$$

Note 1 to entry: The unit of **transmitting voltage response level** is the decibel, dB. The reference value of the transmitting response, S_{ref} , is $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.30, modified – In the definition, "modulus of the" has been added before "**transmitting response to voltage**", and "in decibels" has been added to the end. The formula has been added. Notes to entry have been combined.]

3.14 wavenumber

k

reciprocal of the acoustic wavelength, multiplied by 2π

$$k = 2\pi/\lambda \quad (8)$$

Note 1 to entry: **Wavenumber** is expressed in units of per m, m^{-1} .

Note 2 to entry: In different branches of physics, the term **wavenumber** can be considered equal to either $2\pi/\lambda$ or $1/\lambda$, but in the technical field of acoustics, $2\pi/\lambda$ is preferred. This term is named as "angular **wavenumber**" in IEC 60050-103:2009, 103-10-12.

[SOURCE: IEC 60050-726:1982, 726-05-02, modified – In the definition, "of the waveguide wavelength or the reciprocal of the wavelength for a plane wave" has been replaced by "acoustic wavelength" and "multiplied by 2π " has been added. Notes to entry have been added.]

3.15

hydrophone

electroacoustic transducer that produces electrical voltages in response to water borne pressure **signals**

Note 1 to entry: A **hydrophone** is designed to respond principally to underwater sound pressure.

Note 2 to entry: In general, a **hydrophone** may also produce a **signal** in response to non-acoustic pressure fluctuations (for example, those existing in a turbulent boundary layer during conditions of high water flow).

Note 3 to entry: **Hydrophone** types include reference **hydrophones** and measuring **hydrophones**. Measuring **hydrophones** are used in general measurements of sound fields, and reference **hydrophones** are principally used for calibration purposes (for example in comparison calibrations with measuring **hydrophones**).

Note 4 to entry: **Hydrophones** are principally used as listening devices, but in reciprocity calibration, a **hydrophone** is used as reciprocal **transducer**, not only acting as a **hydrophone**, but also as a projector (sound source).

Note 5 to entry: A **hydrophone** which is integrated with a digital acquisition system is sometimes termed a "digital **hydrophone**", but the combination is best considered as a measuring system, not a **hydrophone** alone.

Note 6 to entry: If a **hydrophone** is connected to a charge amplifier, the sensitivity of the **hydrophone** is sometimes described in terms of charge sensitivity, which is related to the voltage sensitivity of the **hydrophone** by its electrical capacitance.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.17, modified – In the definition, "signals" has been replaced by "voltages".]

3.16

signal

specified time-varying field quantity of interest, such as electric current, voltage, sound pressure, sound particle velocity, or other quantity

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.5.8]

3.17

directional response

directivity

directivity pattern

normalized variation in **transducer** sensitivity with angle, applying to both receive and transmit sensitivity of an **electroacoustic transducer**

Note 1 to entry: The sensitivity value used for normalization is the sensitivity in a specified reference direction, most commonly the sensitivity in the direction of the principal axis of the **transducer** (as defined in IEC 60500:2017).

Note 2 to entry: If the **transducer** is reciprocal, the normalized **directional response** is the same in both transmit and receive modes.

Note 3 to entry: The response is sometimes expressed as normalized **directional response** level in decibels.

Note 4 to entry: **Directional response** can be specified in a two-dimensional space in one plane only. Conventionally, the two-dimensional **directional response** is specified in the three planes defined for the **transducer** coordinate system defined in IEC 60500:2017 (XY, XZ, YZ). In three dimensions, a **transducer directional response** can be specified in all planes through the reference centre.

3.18

angular deviation loss

sensitivity level of the **transducer** on the principal axis minus the sensitivity level of the **transducer** in a specified direction

Note 1 to entry: The loss is expressed as a (relative) level in decibels.

Note 2 to entry: The **angular deviation loss** is the same as the level of the normalized **directional response**.

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-25-69]

3.19

quality factor

Q-factor

Q

measure of sharpness of resonance of a **transducer**, equal to 2π times the ratio of the maximum stored energy to the energy dissipated during one cycle

Note 1 to entry: The quality factor is typically measured as the reciprocal of fractional bandwidth at resonance (see Annex B).

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-24-12, modified – In the definition, "system" has been replaced by "transducer". Note 1 to entry has been added.]

4 Symbols and abbreviated terms

D	largest linear dimension of transducer
C	electrical capacitance
c	speed of sound in water
D_i	directivity index
d	distance between projector and hydrophone
dS	differential area on a sphere
f	acoustic frequency
f_R	resonance frequency (of a transducer)
I	electrical current
I_P	electrical current through projector
I_T	electrical current through transducer
j	square root of minus one
K_f	far-field correction factor
l	width of tank
L_M	free-field receive sensitivity level
$L_{S,I}$	transmitting current response level
$L_{S,V}$	transmitting voltage response level
$\underline{M}_f$	free-field receive sensitivity
$\underline{M}_H$	free-field receive sensitivity of hydrophone
$\underline{M}_T$	free-field receive sensitivity of transducer
$\underline{M}_P$	free-field receive sensitivity of projector (when used as a hydrophone)
$\underline{M}_R$	free-field receive sensitivity of reference hydrophone
p	sound pressure
p_a	sound pressure in the reference direction for R_θ during directional response measurements

P	projector
Q	quality factor of transducer (or measuring system)
r	range from source (distance from source to point in acoustic field)
R	resistance
R_θ	directivity factor
S_I	transmitting response to current
$S_{I,H}$	transmitting response to current of a hydrophone (when used as a projector)
$S_{I,P}$	transmitting response to current of a projector
$S_{I,T}$	transmitting response to current of a transducer
S_V	transmitting response to voltage of a projector
U	electrical voltage
U_H	open circuit voltage at hydrophone
U_R	open circuit voltage at a calibrated reference hydrophone
U_{PH}	open circuit voltage at hydrophone , from a projector as sound source
U_{PH}	open circuit voltage at hydrophone , from a transducer as sound source
U_{PT}	open circuit voltage at transducer , from a projector as sound source
V_P	transmitting electrical drive voltage at projector
V_T	transmitting electrical voltage at transducer
W	bandwidth
Z	electrical impedance
Z_{PH}	electrical transfer impedance of projector and hydrophone
Z_{TH}	electrical transfer impedance of transducer and hydrophone
Z_{PT}	electrical transfer impedance of transducer and projector
θ	vertical angle (elevation angle)
λ	wavelength of sound in water
ρ	density of water
τ	pulse duration
φ	azimuth angle (horizontal plane)
ω	angular frequency

5 General procedures for calibration

5.1 General calibration requirements

5.1.1 Types of calibration

Two general types of calibration are covered within the scope of this document:

- Absolute calibration without the need for an acoustic reference **transducer**

In this case, the calibration is typically based upon the principle of acoustic reciprocity, with the method requiring three **electroacoustic transducers**, at least one of which is required to be a **reciprocal transducer**. This is a primary calibration method, mainly traceable to primary electrical standards, and is capable of achieving high accuracy.

- Relative calibration using a calibrated acoustic reference **transducer**

Here, the calibration is performed by comparison to another acoustic **transducer** which has already been calibrated. The reference **transducer** may be either a calibrated **hydrophone** or a calibrated **projector**. The accuracy is typically degraded compared to a reciprocity calibration, mainly due to the added uncertainty contributed by the acoustic reference device.

5.1.2 Acoustic field requirements

For the calibrations to be valid, the following general requirements shall be satisfied [3] [4] [5]:

- acoustic free-field conditions, requiring minimal influence from acoustic reflections from medium boundaries (see 5.2);
- **acoustic far-field** conditions, requiring a sufficient separation distance between source and receiver (see 5.3);
- acoustic steady-state conditions, requiring any transient behaviour displayed by resonant **transducers** to have died down (see 5.4).

5.2 Acoustic free-field requirements

5.2.1 Continuous signals

With continuous **signals**, to limit the fluctuations in **signal** amplitude due to interference from boundary reflections, the minimum distance from the **transducers** to nearest medium boundary shall be such that the amplitude of the reflected **signals** is no more than 3 % of the amplitude of the direct **signal**.

NOTE 1 For a given measurement configuration, the minimum distance to the boundaries to satisfy the above requirement depends on the **directivity** of the **transducers**, the reflection coefficient of the boundary surfaces and on the **signal** frequency (at high acoustic frequencies, absorption in the water will increase the propagation loss, and reduce the minimum distance needed). An individual assessment of these factors can be undertaken before deciding on the minimum distance to the boundaries to meet the requirement for continuous **signals**. Often the water surface is the nearest boundary. As an example, for two omnidirectional **transducers** positioned at 5 m separation, for the amplitude of reflections to be within the above requirement, the **transducers** are positioned at a depth of approximately 16 m (assuming total sound reflection occurs at the water surface, and that the acoustic frequency is sufficiently low that absorption is not significant) [4] [5].

NOTE 2 An alternative means of achieving acoustic free-field conditions for continuous **signals** is by use of an anechoic acoustic lining deployed on the inner surface of a test tank. In this case, the performance of the anechoic material (in terms of reflection loss as a function of angle) needs to be sufficient to achieve the above requirement for reflected **signal** amplitude at the **hydrophone** over the frequency range of interest. Note that the water surface is a strong reflector of sound, and a fully anechoic test tank will require the anechoic material to be suspended just below the water surface, in addition to lining the walls and floor of the tank [4].

NOTE 3 Some calibration methods using reverberant water tanks make use of continuous **signals** (or at least **signals** that are significantly longer than the echo-free time of the tank). In such methods, pseudo-free-field conditions can be achieved by use of **signal** processing techniques which compensate for the effect of reflections from the tank boundaries. See Annex J for examples of such methods.

5.2.2 Time-limited signals

When time-limited **signals** are employed, such as pulses or bursts of single frequency (tone-burst **signals**), reflections shall be eliminated by choosing the minimum distance from the **transducers** to each boundary surface (water surface, tank bottom and side walls) such that the time delay of the reflected **signals** with respect to the direct **signal** is greater than the duration of the direct **signal**.

NOTE Burst or pulsed **signals** can be used in finite-sized test tanks to eliminate reflections by use of **signals** of finite time duration and suitable time-windowing. In this way, the reflected **signals** arrive sufficiently later than the direct **signals** that there is sufficient echo-free **signal** to undertake the required analysis. In such cases, there is a lower limiting frequency below which it is not possible to make measurements of the steady-state **signal** by conventional means. See Annex E for a detailed description of the use of pulsed and burst **signals** in calibration [4] [5] [6].

5.3 Acoustic far-field requirements

The distance d between the **projector** and the **hydrophone** shall be sufficiently large that the **acoustic far-field** conditions are met and errors due to the finite size of the **transducers** are minimized. To this end, the **projector-hydrophone** separation shall be larger than the size of the largest **transducer**, and the **hydrophone** shall be positioned in the **acoustic far-field** of the source.

For the two **transducers** with maximum dimensions of the sensitive areas of D_1 and D_2 respectively, the minimum separation distance, d , shall be chosen according to the relations:

$$d > K_f \left(\frac{D_1^2}{\lambda} + \frac{D_2^2}{\lambda} \right) \quad (9)$$

and simultaneously:

$$d > 5D_1 \quad \text{and} \quad d > 5D_2 \quad (10)$$

where K_f is the far-field correction factor chosen to ensure that the acoustic field approximates to spherical spreading to within a specified tolerance.

To obtain a separation that reduces the error due to lack of spherical divergence to less than 0,2 dB, the value of K_f in Formula (9) shall be chosen to be greater than 1,3.

See Annex D for more details on the above criteria.

NOTE When measuring the **directional response** of a **transducer**, the distance between the **projector** and the **hydrophone** is chosen to be larger than that given by Formulae (9) and (10). The distance is less than twice that given by Formula (9) or Formula (10), whichever is larger. See Annex D and references [3] to [9].

5.4 Requirements for steady-state conditions

When tone-burst **signals** are used in calibration, the time-window employed to select the **signal** for analysis shall be positioned such that the start of the window is at a time delay which is at least Q cycles of the **projector** resonance frequency after the arrival of the direct **signal**, where Q represents the quality factor (Q-factor) of the **projector**'s main resonance.

The requirement of 5.4 applies only for time-limited signals. When continuous signals are used, the transducers are regarded as having reached steady-state conditions.

NOTE 1 In the conventional arrangement for tone-burst **signals** used for calibrations in test tanks, measurements are made on the steady-state portion of the received **signal**, with time-gating techniques used to isolate the direct-path **signal** from reflections from the tank boundaries and the water surface. In such measurements, the steady-state **signal** available for analysis is limited in time both by the arrival of boundary reflections, and by start-up transients caused by the resonant behaviour of the **transducers** under test. For a simple measuring **hydrophone**, the Q-factor is typically of the order of only 3 or 4 with a relatively high resonance frequency, leading to short start-up transients which place little restriction on the **signal** duration available for measurement. However, **transducers** used as **projectors** can possess a higher Q-factor, which reduces the available **signal** (particularly if the resonance frequency is low) [4] [5] [6] [10].

NOTE 2 If the voltage **signal** generated by the **hydrophone** does not reach steady-state conditions during the available echo-free time, it is not possible to observe the steady-state directly. This means that for a given tank size and **transducer** Q-factor, there will be a lower limiting frequency below which it is not possible to perform calibrations by using tone-burst **signals** by conventional means. See Annex E for more guidance on ensuring steady-state conditions.

NOTE 3 If narrow-band filtering is applied to the **signals** (perhaps to increase the **signal**-to-noise ratio in the presence of broadband noise), this will modify the transient build-up at the start of the tone-burst. Although such filtering can eliminate the transients due to higher frequency **transducer** resonances, it can also delay the onset of steady-state and reduce the **signal** duration available for analysis. For this reason, filter bandwidths narrower than one-octave are rarely used in calibration with tone-burst signals.

NOTE 4 The required **signal** parameters can also be determined using more advanced **signal** processing techniques. These make it possible to estimate the amplitude and phase of the steady-state **signal** without the need to observe a full steady-state period. These include the use of advanced **signal**-modelling and **signal** prediction methods which utilise the transient part of the **signal** to predict the steady-state amplitude and phase, and also the use of quadrature-supplemented tone bursts (see Annex E and Annex J for more details).

5.5 Equipment requirements

5.5.1 Calibration facility

The calibration facility used shall be capable of realizing the acoustic requirements described in 5.2, 5.3 and 5.4 over the desired range of acoustic frequencies and for the **hydrophone** and **transducer** types under test.

The calibration facility shall enable a minimum of at least two **transducers** at a time to be positioned reproducibly at a known separation distance and aligned for calibration in conformance with the requirements of 5.6.

NOTE 1 The most common type of calibration facility is based around a water-filled test tank constructed from concrete, steel or wood (leading to the tank being reverberant due to the reflective boundaries). Time-limited **signals** (such as tone-bursts) are used with time-gating to eliminate the reflections. Such a facility allows for convenient access, precise positioning of devices (by use of a rigid support framework or positioning system), and control over the environmental conditions. However, the finite size places limitations on the frequency range and type of **transducer** to be calibrated. Testing of a large aperture **projector** at high frequencies (a 'high ka value' **transducer**) can be difficult in a small test tank because it is not always possible to achieve **acoustic far-field** conditions (see 5.3). A small test tank will also limit the echo-free time such that it is not always possible to observe the steady-state **signal** for high Q-factor **transducers** (see 5.4). See Annex E for more guidance and references [3] to [6], [10].

NOTE 2 If the test tank is lined with an anechoic material, it is possible to achieve free-field conditions required by 5.2 in a smaller test tank, depending on the validated performance of the anechoic material (see 5.2.1). However, deploying the **transducers** into the tank can present more practical difficulty if the water surface is covered with the anechoic material [4].

NOTE 3 For open-water facilities, the deployment of the **transducers** is typically achieved from the surface using a floating structure such as a raft or pontoon. The **transducers** are typically deployed at greater depth than for tanks, but the precision of the positioning and alignment can be degraded compared to test tanks. The lack of control over the environmental conditions can present additional problems from: (i) variations in water temperature (both diurnal and seasonal) causing changes in **transducer** performance and introducing thermoclines; (ii) weather (wind and wave action) causing relative motion of the **transducers**; and (iii) acoustic noise from natural sources and other human activities in the vicinity [4].

5.5.2 Instrumentation

5.5.2.1 General

The following measuring instrumentation is required in order to perform a calibration of an underwater **electroacoustic transducer**. All are required to have a performance that covers the desired acoustic frequency range for calibrations (this is a maximum of 200 Hz to 1 MHz, but can be a narrower range depending on the application) [4], [6], [10].

5.5.2.2 Signal source

This shall be used to provide the electrical **signal** to drive **projectors**. It can also be used to provide the trigger used for synchronizing the **signal** acquisition by the digitizer.

NOTE Typically, the **signal** source will provide a maximum output of only a few volts, but will provide a range of **signal** types, including gated-bursts of single frequency.

5.5.2.3 Power amplifier

This is required to drive the **transducer** used as a **projector** with sufficient electrical power to generate sound pressures at the **hydrophone** which are at least 6 dB higher than the ambient noise in the facility.

NOTE 1 Typically, a power amplifier capable of 100 W output power is sufficient for most **hydrophone** and **transducer** calibration purposes, but higher power performance can sometimes be required for specialized applications.

NOTE 2 Typically, the power amplifier will have a low electrical output impedance (but alternatively can have the output electrical impedance matched to the **transducer** for maximum power delivery).

5.5.2.4 Hydrophone preamplifier

This shall be required to amplify the electrical voltage developed by the **hydrophone**, and shall ideally have electrical input impedance greater than the **hydrophone** by at least a factor of 100 (since the electrical impedance of a piezoelectric **hydrophone** is mostly capacitive, the input capacitance of the preamplifier shall have a sufficiently low value).

NOTE 1 Typically, the preamplifier will have selectable voltage gain and has selectable electronic filtering (alternatively, filtering can be accomplished by use of a separate dedicated unit, or can be achieved digitally in post-processing).

NOTE 2 A separate **hydrophone** preamplifier is not needed when using a **hydrophone** with a built-in integral preamplifier.

5.5.2.5 Current measuring instrument

This is required if the electrical drive current through the **projector** is measured (for example, during a free-field reciprocity calibration). Preferably, this should consist of a calibrated current transformer which provides an output voltage proportional to electrical current (with the voltage then measured by the digitizer along with the **hydrophone** voltage).

NOTE As an alternative, a calibrated resistor and voltmeter can be used.

5.5.2.6 Drive voltage measurement instrument

This is required if the electrical drive voltage to the **projector** is measured, for example, when determining the **transmitting response to voltage** (TVR).

NOTE This typically will consist of a high impedance voltage probe, or a calibrated attenuator to reduce the drive voltage down by up to 40 dB so that it can be measured by the digitizer.

5.5.2.7 Digitizer

The digitizer used shall be an analogue-to-digital converter (ADC) or digitizing oscilloscope, which captures a digital waveform as a record of the electrical **signals** during calibration (**hydrophone** voltage, voltage from the current transformer, etc.).

The sampling rate of the digitizer shall be at least two and a half times the maximum frequency of interest, and the resolution shall be sufficient for accurate recording of the **signal** without quantization errors, with a recommended minimum resolution of 8 bit. It is recommended that the digitizer be capable of being externally triggered (typically by the **signal** source or computer). When making absolute electrical measurements, the digitizer shall be calibrated over the range of operation.

The requirement for unambiguous representation of the signals within the desired frequency range requires the sampling rate of the ADC to be greater than the Nyquist rate of the signal which is input to the ADC.

NOTE 1 Digitizers and digitizing oscilloscopes of the required sampling rates are readily available with resolutions of between 8 bit and 16 bit. The higher the resolution, the better for measurement of the signals, with less likelihood of errors due to quantization noise.

NOTE 2 To provide an anti-aliasing function, a low pass filter can be used which is designed to restrict the frequency content of the signal before digitization to below the Nyquist frequency of the acquisition system.

5.5.2.8 Computer controller

It is recommended that the calibration be controlled by a computer running appropriate acquisition software which controls the digitizer and **signal** acquisition (and can also provide the trigger for the **signal** source).

NOTE 1 The software will typically be used to undertake the required **signal** analysis, including the time-windowing and calculation of the amplitude of the recorded **signals**. However, some of these functions can be undertaken using the on-board processing features available on a digitizing oscilloscope.

NOTE 2 Although some of the above measurement tasks are capable of being performed manually (for example using an analogue oscilloscope), this practice is now discouraged.

5.5.2.9 Electroacoustic transducers

A number of **transducers** is required for use as **projectors** and **hydrophones** during calibrations. For example, calibration by three-**transducer** free-field reciprocity requires at least two **transducers** in addition to the device under test (see Clause 8), and relative calibration by use of a calibrated **hydrophone** or **projector** requires calibrated reference **transducers** and potentially auxiliary **projectors** for use in generating a suitable acoustic field (see Clause 9).

NOTE It is possible that a number of different **transducers** will be required to cover a wide frequency range (this is especially true for **projectors** which can have a limited frequency range due to their inherently resonant behaviour).

5.6 Positioning and alignment

5.6.1 Coordinate system

The angular coordinate system chosen shall be that specified by IEC 60500:2017.

5.6.2 Reference direction

Before calibration, a reference direction shall be defined for each **hydrophone** and **projector**. Unless there is good reason, the reference direction shall be chosen to be coincident with the principal axis of the **hydrophone** or **projector** [as defined in IEC 60500:2017].

For omnidirectional **hydrophones** with a symmetric construction, the reference direction shall be in a plane orthogonal to the axis of the **hydrophone** body and shall be indicated by a mark on the body of the **hydrophone** [10].

NOTE 1 The reference direction is the direction for which the free-field calibration will be valid. For directional **transducers**, the reference direction will in general be chosen to coincide with the principal axis of the **transducer**.

NOTE 2 The direction can also be chosen by determining the angle of maximum response of the **transducer** at a stated frequency by undertaking a **directional response** measurement (see Annex A for a description).

5.6.3 Transducer mounting and support

Each **projector** and **hydrophone** shall be firmly attached to a mount and support which enables the devices to be positioned accurately and reproducibly at fixed points in the water.

The supporting mount for a **hydrophone** shall be chosen to cause minimal influence on the measured sensitivity, as far as is commensurate with the above requirement for precise positioning of the **transducers**.

If a rotational stage is incorporated into the support framework or positioning system, the mount shall enable a **transducer** to be positioned with its reference centre located along the axis of rotation.

If the mount is considered to influence the measured sensitivity, the **transducer** shall be calibrated in the same mount that will be used when the device is deployed for measurements made in the field. Where the device is thought to be sensitive to the type of support or mount, a description of the mounting arrangement shall be stated with the results.

Some **transducers** are more susceptible than others to the influence of the method of mounting. To avoid the influence from the mount, it is recommended to avoid air-filled supports or poles. Where possible, it is recommended to use free-flooding supports such as hollow poles, constructed from carbon-fibre or plastic. However, note that a certain degree of rigidity is required of any mount for precise positioning and alignment [10].

For some directional **transducers**, a right-angled bracket is required to position the **transducer** at the correct orientation in the water to align the principal axis with that of the other **transducer**.

If the **transducer** is heavy, a counterweight is required to prevent the support tilting and causing the principal axis to deviate from the desired horizontal orientation. Note that if such a right-angled bracket is used, the **transducer** reference centre shall still be located along the axis of rotation of any rotational stage incorporated into the support framework or positioning system [4], [10].

Take care to minimize the amount of structure borne noise which can be picked up by the mount and supporting framework and communicated to the **transducers**.

5.6.4 Alignment

Before each acoustic measurement during the calibration, the relevant **transducer** pair (for example, a **projector** and **hydrophone**) shall be positioned at the same water depth and oriented such that the reference directions of the **transducers** are aligned. [4], [10]

NOTE 1 This alignment can be performed either mechanically using special mounting poles or rigging, or by use of an automated positioning system (for example, consisting of stepper motors and controllers). When the **transducers** are both small omnidirectional **hydrophones** which show little change in sensitivity with angle, mechanical alignment is more commonly used than acoustic alignment. Note that the lengths of the mounting poles to the **hydrophone** active elements are carefully measured so that they can be immersed precisely to the same depth.

NOTE 2 For **transducers** that show appreciable **directivity** about their principal axis, the **transducers** can be aligned acoustically by looking for the maximum received **signal** at a specific frequency. Sometimes the reference direction is chosen at an angle of the **directional response** pattern where the response does not change significantly with the directional angle, for a specific frequency. Note that if a reference direction is chosen this way, the same direction is then chosen for all frequencies.

NOTE 3 For acoustic alignment between two **transducers** (by searching for the maximum received **signal** at a specific frequency), a minimum of two degrees of freedom are required for each **transducer** mount: vertical displacement in the water to enable the **transducer** depths to be modified; and rotation about a vertical axis which goes through the **transducer** reference centre by use of a rotational stage incorporated into the support framework or positioning system.

5.6.5 Separation distance

The mounting and support framework shall enable the **projector** and **hydrophone** to be deployed in the water at a known separation distance, with uncertainty of better than 2 %.

When a **hydrophone** has a body which is large compared to the active element, it is recommended that the **hydrophone** be calibrated at the largest separation feasible in the facility (so that the incident field provides as close an approximation to a plane-wave as possible). In addition, it is recommended that the separation be reported with the calibration results.

NOTE 1 The separation distance can be measured mechanically in a number of ways. A rigid support framework can be calibrated such that the **transducer** mounting poles are suspended from fixed positions on the framework above the tank, with known separations between the pre-set positions (assuming that the **transducers** hang vertically). If an automated positioning system is employed which has been calibrated, the **transducer** separation can be taken from the displays of the controllers. Note that adjustments sometimes need to be made to account for any slight off-sets introduced when mounting the **transducers**.

NOTE 2 The separation distance can be calculated from the acoustic propagation delay between the **signal** trigger and the direct **signal** arrival at the **hydrophone**. This assumes a knowledge of the speed of sound which can be calculated using formulae from the scientific literature and knowledge of the water temperature, depth and salinity [11] to [14]. Note that a **transducer** begins to respond to the sound wave as soon as it impinges on the active element, and so for a large spherical or cylindrical device, a small correction sometimes has to be made to the acoustically derived separation distance to obtain the separation of the **transducer** reference centres (for example, to account for the radius of each device).

NOTE 3 When a **hydrophone** has a body which is large compared to the active element, the scattered sound incident on the body can interfere with the sound wave arriving directly at the element and cause small fluctuations in the frequency response. For modest separation distances, these fluctuations can vary with **projector-hydrophone** separation due to small changes to the acoustic path differences as the separation distance is varied [15], [16].

5.7 Representation of the frequency response

A sufficient number of acoustic frequencies shall be chosen for calibration to ensure that the **transducer** performance is well characterized over the desired frequency range.

For **hydrophones**, over the low-frequency range where the sensitivity is relatively invariant with frequency, the minimum recommended resolution for the acoustic frequencies is one-third octave spacing.

For **projectors**, and for **hydrophones** close to the resonance frequency, the sensitivity varies more dramatically with frequency and the minimum recommended resolution for the acoustic frequencies is one-twelfth octave spacing.

5.8 Frequency limitations

5.8.1 High-frequency limit

The calibration methods described herein can be used for frequencies up to 1 MHz, but the uncertainties can be greater at frequencies of hundreds of kilohertz. Due consideration shall be given to the limitations of the method at high frequencies, and the influence of any limitations shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty (see Annex E).

NOTE 1 The minimum separation distance required to allow suitable **acoustic far-field** conditions to exist for a specific **transducer** pair increases with frequency (see 5.3). At sufficiently high frequencies, the distance required to achieve **acoustic far-field** conditions can exceed the tank dimensions. Also, when using tone-burst **signals**, increasing the **transducer** separation distance will tend to reduce the echo-free time available because the **transducers** are closer to the tank boundaries, making measurements more difficult.

NOTE 2 The attenuation of sound due to absorption in the water increases rapidly with frequency, reaching approximately 0,25 dB/m at 1 MHz for fresh water (at 16 °C) and approximately 0,4 dB/m for sea water (at 8 °C, 5 m depth, pH of 8 and salinity of 35 parts per thousand). This will increase the propagation loss at very high frequencies causing the **signal**-to-noise ratio available for large separation distances to become poor. If very high acoustic frequencies are used in calibration, corrections will need to be made for propagation loss due to sound absorption by water. The attenuation of sound due to absorption in the water over the separation distances typically used in calibration is relatively small. The correction is less than 0,05 dB and can be neglected for separation distances of the order of a few metres and acoustic frequencies less than 500 kHz in fresh water, and for frequencies less than 300 kHz in sea water. Information on the absorption of sound in water, and its dependence on temperature, depth, pH and salinity, is available in the scientific literature (see Annex E and references [17] to [22]).

NOTE 3 The high-frequency limit is governed by a number of factors. These are described in detail in Annex E.

NOTE 4 At frequencies greater than 0,5 MHz, the alternative primary calibration methods described in IEC 62127-2 [2] and in Annex I can be used.

5.8.2 Low-frequency limit

Due consideration shall be given to the limitations of the calibration method at low frequencies, and the influence of any limitations shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty.

NOTE 1 One of the main limitations when using tone-burst **signals** in finite-sized test tanks is that the small number of cycles of steady-state **signal** available for measurement depends on the quality factor of the **transducers** and the echo-free time of the test tank (which in turn depends upon tank size and **transducer** separation). As the frequency is lowered, the number of cycles in the available time-window is reduced until eventually the steady-state **signal** amplitude can no longer be determined by conventional means. This provides a lower limiting frequency on measurements made using tone-burst **signals**. For most large test tank facilities of minimum dimension 5 m or greater, the practical low-frequency limit for calibration of **hydrophones** will be of the order of 1 kHz depending on the Q-factor of the source **transducer** which governs the slope and sharpness of resonance of the transmitting response. The factors governing the lowest frequency for calibrations are described in detail in Annex E.

NOTE 2 In addition, the sound pressure level produced by the **projector** will be reduced as the frequency is lowered, eventually falling to where it is less than 6 dB above the ambient noise level, thereby limiting the minimum frequency for calibrations.

NOTE 3 For continuous **signals** in anechoic tanks, the performance of the anechoic lining can degrade at low frequencies, limiting the ability to achieve free-field conditions.

NOTE 4 The lower frequency limit for free-field calibration in reverberant tanks can be extended by use of more sophisticated **signal**-processing techniques. With some of these techniques, it is not necessary to have a complete **signal** period for amplitude and phase estimation. See Annex E and Annex J for more details.

5.9 Checks for acoustic interference

With tone-burst **signals**, a tone-burst repetition rate shall be chosen that is low enough for all reverberation in the tank to die away before transmission of the next pulse.

The interference level from reflected acoustic **signals** shall be at least 30 dB lower than the **signal** level.

NOTE 1 Further details on the influence of reflections are given in Annex E.

NOTE 2 Where smooth periodic ripples can be observed in a plot of **electrical transfer impedance** (or sensitivity) against frequency, this is an indication that there is likely to be acoustic reflections present leading to constructive and destructive interference effects. If the frequency interval between successive peaks in the plot is Δf and c is the speed of sound in the medium, the path difference Δd between the direct and reflected **signals** arriving at the **hydrophone** can be calculated from $\Delta d = c/\Delta f$ [1].

NOTE 3 The oscillations caused by a reflected acoustic **signal** with a path difference Δd can be eliminated by a complex moving averaging of the frequency dependence of the transfer impedance in the frequency interval Δf . The methods for free-field calibration in the reverberation sound fields of **signals** with a power distributed in the frequency band are based on this approach. See Annex J for more details.

6 Electrical measurements

6.1 Signal type

The default electrical **signal** used for the calibration is either continuous wave (sinusoidal) or tone burst (gated sine wave).

Whatever **signal** type is chosen, the requirements of 5.2, 5.3 and 5.4 still apply. Note that requirements for achieving an acoustic free-field will vary depending on the **signal** type used (see 5.2).

NOTE Other **signal** types are possible, such as short broadband pulses or frequency modulated chirps. The **signal** analysis techniques for such **signals** will require spectral analysis to determine the **signal** amplitude (and phase) as a function of frequency. Where **signal** analysis is undertaken by Fourier transform, the frequency resolution (specified in 5.7) will depend on the **signal** record length.

6.2 Electrical earthing

In order to avoid earth loops, the electrical terminals of the **transducers** shall be kept free from contact with the water. Exposed metal parts of one **hydrophone** shall be the only earth connection for the cable screen of the **hydrophone** and for the **hydrophone** amplifier. All other earth contacts shall be excluded.

6.3 Measurement of hydrophone output voltage

6.3.1 General

The open-circuit voltage of the **hydrophone** shall be measured at the end of the **hydrophone** cable. The electrical terminals selected shall be specified (see IEC 60500:2017, 3.7).

For tone-burst **signals**, the **hydrophone** voltage waveform shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

For a continuous wave **signal**, the measurement shall be done using a voltmeter of high electrical input impedance, or by a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter is used in combination with the voltmeter or digitizer to form an absolute measuring channel, these elements shall be calibrated. However, a calibration is unnecessary if the same measuring channel is used only for the measurement of voltage ratios, though in this case, the linearity of this channel shall still be determined. When measuring voltage ratios, both voltages shall be expressed in the same metric (for example, both as peak voltages, or both as root-mean-square voltages).

6.3.2 Signal analysis

For tone-burst **signals**, the **signal** amplitude (and if required, **signal** phase) shall be determined from the time-windowed **hydrophone** voltage waveform, with the time window positioned on the steady-state portion of the echo-free **signal**. The start of time window shall be positioned on the waveform after any **projector** start-up transients have died down, and the end of the window shall be positioned before the arrival of the first reflected **signal** or before the end of the direct **signal** (whichever occurs first). See Annex E for more guidance on measuring amplitude and phase of time-windowed steady-state **signals**.

6.3.3 Electrical loading by measuring instruments

During the measurements, the **hydrophone** shall be connected to a high electrical input-impedance measuring instrument (preamplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer) such that the electrical input impedance is much larger than the electrical impedance of the **hydrophone** (ideally, more than 100 times larger).

When measuring the phase angle of the **hydrophone** output voltage, the electrical input impedance of the measuring instrument should ideally be more than 1 000 times the electrical impedance of the **hydrophone**.

Where the electrical impedance of the **hydrophone** is high (for example, for a small piezoelectric **hydrophone** of low capacitance), consideration shall be given to the electrical loading of the **hydrophone** by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage. The corrections may be calculated using the procedure given in Annex C [2].

NOTE If the same electrical load is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, the corrections can be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

6.3.4 Electrical loading by extension cables

If an extension cable of significant length is attached to the **hydrophone**, this cable will electrically load the **hydrophone** reducing the measured end-of-cable voltage (and therefore, the sensitivity). In this case, corrections shall be applied to obtain the open-circuit end-of-cable **hydrophone** voltage. Guidance on calculating the electrical loading correction is given in Annex C.

NOTE 1 Where the cable and **hydrophone** appear electrically to be purely capacitances (this is generally true for a cable and is true for a **hydrophone** in the frequency range well below resonance), a correction can be derived from the capacitances of the **hydrophone** and cable. See Annex C for further details [23].

NOTE 2 Where the electrical impedance of the **hydrophone** is not purely capacitance, for example, at frequencies close to resonance, the complex electrical impedance of the **hydrophone** and extension is used to calculate the loading correction. See Annex C for further details [23].

NOTE 3 If the same extension cable is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, the corrections can be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

6.3.5 Electrical noise

The **signal**-to-noise ratio shall be sufficient that the measurements can be made without significant loss of accuracy. The measured sound pressure should be at least 6 dB greater than the equivalent bandwidth noise pressure (see IEC 60500:2017).

The level of broad-band interfering noise can be reduced by the use of a band-pass filter. However, the bandwidth shall be sufficiently wide to allow the **signal** to pass through without distortion.

NOTE 1 The level of electrical noise can degrade the accuracy when making electrical measurements [3], [4]. The **signal**-to-noise ratio is likely to be lower when using **projectors** at frequencies well below resonance.

NOTE 2 In the presence of electrical noise, the **signal** to noise ratio can be improved by coherent averaging of repeated **signals**. For random noise, averaging N **signals** will improve the **signal** to noise ratio by a factor of $\sqrt{N}$ (square root of N).

6.3.6 Cross-talk

In the presence of coherent interference from electrical cross-talk, **signal** averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement in accuracy. Therefore, in such cases, efforts shall be made to determine the cause of the problem and steps taken to minimize the effects by suitable electrical grounding, for example of the **projector** drive cables.

In the case of a continuous wave **signal**, the electrical cross-talk level shall be at least 40 dB lower than the **signal** level.

Where cross-talk is present with tone-burst **signals**, this will only cause interference if the length of the burst is greater than the acoustic propagation delay. If the cross-talk cannot be eliminated by suitable electrical grounding, the length of the burst shall be reduced so that there is no overlap in time with the acoustic **signal**.

NOTE For burst **signals**, the effect of the interference can also be significantly reduced by signal subtraction. This is done by fitting an approximation to the cross-talk **signal** at the frequency of the drive **signal** in the region before the acoustic **signal** arrival, continuing the approximation for the duration of the overlap of the transmitted **signal** with the acoustic **signal**, and then subtracting it from the total **signal** in the region of overlap. The effect of cross-talk can also be determined by observing the **signal** change when the distance between the **projector** and receiver is modified by a predetermined amount (for example, by half of the acoustic wavelength).

6.3.7 Integral preamplifiers

Where a **hydrophone** has an integral preamplifier, the sensitivity shall be expressed as end-of-cable sensitivity (by including the performance of the preamplifier as part of the device).

NOTE Where a **hydrophone** has an integral preamplifier, corrections for electrical loading by extension cables or measuring instruments are unnecessary [23].

6.4 Measurement of projector drive current

6.4.1 Instrumentation

The current through the **projector** should be determined by a calibrated current transformer (producing a voltage proportional to the drive current).

For tone-burst **signals**, the voltage waveform from the current transformer shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

For a continuous wave **signal**, the voltage from the current transformer shall be measured using a voltmeter of high electrical input impedance, or by a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter is used in combination with the voltmeter or digitizer to form an absolute measuring channel, these elements shall be calibrated, unless the same measuring channel is also used only for the measurement of voltage ratios.

NOTE Although the current transformer is the preferred instrument, an alternative method is to measure the voltage drop across a small-valued calibrated resistor (value of only a few ohms) connected in series with the **projector**.

6.4.2 Signal analysis

For tone-burst **signals**, the **signal** amplitude (and if required, **signal** phase) shall be determined from the time-windowed voltage waveform from the current transformer, with the time window positioned on the steady-state portion of the echo-free **signal**.

The start and end of the time window shall be positioned on the waveform at the same positions chosen for the **hydrophone** voltage (see 6.3.2).

6.5 Measurement of projector drive voltage

6.5.1 Instrumentation

The drive voltage across the **projector** shall be determined by a calibrated high impedance voltage probe (scope probe), or a calibrated attenuator to reduce the drive voltage down by approximately 40 dB so that it can be measured by the digitizer.

For tone-burst **signals**, the voltage waveform from the scope probe or a calibrated attenuator shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

For a continuous wave **signal**, the voltage from the scope probe or a calibrated attenuator shall be measured using a voltmeter of high electrical input impedance, or by a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter is used in combination with the voltmeter or digitizer to form a measuring channel, these elements shall be calibrated, unless the same measuring channel is also used only for the measurement of voltage ratios.

6.5.2 Signal analysis

For tone-burst **signals**, the **signal** amplitude (and if required, **signal** phase) shall be determined from the time-windowed voltage waveform from the scope probe, or a calibrated attenuator, with the time window positioned on the steady-state portion of the echo-free **signal**.

The start and end of the time window shall be positioned on the waveform at the same positions chosen for the **hydrophone** voltage (see 6.3.2).

7 Preparation and conditioning of transducers

7.1 Soaking

Before calibration, the **transducers** shall be soaked for a short time sufficient to allow equalization of temperature with the water.

If the air temperature where the **transducer** is stored and prepared is close to that of the water (as would be the case for an indoor test tank), the length of soaking time need only be a few minutes. However, for cases where the water temperature is significantly lower than the air temperature in the laboratory (as might be the case for an open-water facility in winter conditions), soaking time of at least 30 minutes is recommended.

7.2 Wetting

A wetting agent such as a mild detergent shall be applied to the whole **transducer** surface before immersion in water. No dry patches shall be visible on the wetted **transducer** when it is immersed and then quickly removed from the water [24].

NOTE 1 The aim of wetting the **transducer** is to mitigate the effect of gas bubbles or trapped air clinging to its surface. Trapped air and bubbles cause significant scattering of sound waves and can behave in a strongly resonant manner, causing unpredictable errors in the calibration results. The application of a detergent as a wetting agent reduces the surface tension of the water and hinders the adhesion of bubbles to the surface.

NOTE 2 The presence of trapped air can sometimes manifest itself as a film of air which appears as a silvery sheen on the **transducer** surface. Any recesses on the **transducer** case (such as those adjacent to gaskets or screw fittings) can trap air bubbles. In cases where trapped air or bubbles are evident, the detergent can be applied several times.

NOTE 3 The process of air bubbles attaching to the **transducer** surface is more evident when immersing warm **transducers** into cold water because the warmer **transducers** have a slight heating effect on the colder water in contact with the **transducer** surface, causing dissolved gas to come out of solution (air is less soluble in warm water than cold).

7.3 Extending the hydrophone cable

If the cable to the **hydrophone** needs to be lengthened for the purposes of the calibration (for example in order to reach the instrumentation), then the guidance in 6.3.4 shall be followed.

NOTE A description of how to account for the influence of extension cable is given in Annex C [23].

7.4 Environmental conditions (temperature and depth)

Where the sensitivity of a **transducer** is required for specific conditions of water temperature and depth of immersion, the **transducer** shall either:

- a) be calibrated under the same conditions of temperature and depth for which it will be used in the field; or
- b) have corrections made to sensitivity values to account for the different environmental conditions, with corrections based on earlier calibrations as a function of temperature or depth, or by use of validated analytical models.

NOTE 1 The sensitivity of some **electroacoustic transducers** can vary with both ambient temperature and depth of immersion (the latter due to increased hydrostatic pressure) [25], [26]. The ability to conduct calibrations under a range of values of temperature and depth is relatively rare because specialized facilities are required [25], [26].

NOTE 2 The environmental conditions that exist in an indoor test tank facility are unlikely to replicate the conditions that exist in the ocean (for example, for water temperature or depth). Calibrations are strictly valid only for the conditions that pertain during the calibration. If an estimate is required of the performance under ocean conditions, the sensitivity obtained from the tank calibration can be corrected (with a suitable uncertainty component added to reflect the uncertainty in the correction) [25], [26].

NOTE 3 For measurements made in open-water facilities, the environmental conditions (water temperature or depth) are, in general, not the same as those for the intended end-user application. If an estimate is required of the performance under the conditions that pertain to the end-user application, the sensitivity obtained from the open-water facility can be corrected (with a suitable uncertainty component added to reflect the uncertainty in the correction) [27].

8 Free-field three-transducer spherical-wave reciprocity calibration

8.1 General principle

Three **transducers** (the **transducer** triad) shall be used for the calibration technique, of which at least one shall be reciprocal. For convenience, the three devices shall be labelled P (**projector**), H (**hydrophone**), and T (reciprocal **transducer**).

The devices shall be paired off in three measurement configurations, as shown in Figure 1. If the **projector**, P, is also a reciprocal **transducer**, then the fourth configuration also shown in Figure 1 shall also be employed.

For each measurement configuration, the **transducer** pair shall be deployed in water separated by a known distance, d , with their axes aligned towards each other (8.2.1, 8.2.2).

For all configurations, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

In each case, using one device as a **projector** and the other as a **hydrophone**, the **electrical transfer impedance** shall be determined at the desired number of frequencies throughout the frequency range of interest (8.2.4).

Using at least the first three configurations of **transducer** pairs, the **free-field receive sensitivity** and **transmitting response to current** of any of the three devices is calculated at

each frequency of calibration from the measurements of purely electrical quantities (transfer impedances), the separation distance, and the water density and acoustic frequency. (8.2.5, 8.2.6).

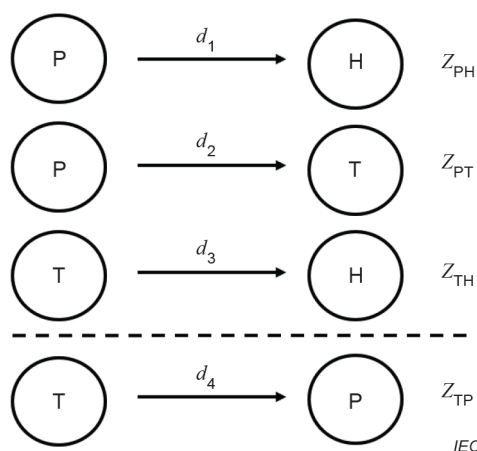


Figure 1 – Measurement configurations for three-transducer reciprocity

If the **projector**, P, is also a reciprocal **transducer**, then the measurement of the fourth **electrical transfer impedance** (see Figure 1) can be used to determine the validity of the assumption of reciprocal behaviour (8.2.8). Detailed derivations of all formulae for reciprocity calibrations can be found in Annex G.

NOTE 1 There are a number of calibration configurations which are based on the principle of acoustic reciprocity. [28] to [32]. The description here of the reciprocity calibration method is for three-**transducer** spherical-wave reciprocity only. The reciprocity calibration method can be applied to other configurations which use different acoustic field geometries such as acoustic plane-wave or cylindrical wave, and can be applied to pressure calibrations undertaken inside a closed coupler [1], [3], [33] to [36]. A self-reciprocity calibration can also be undertaken using a reflector which provides a specular acoustic reflection. [2], [37] to [39]. In each case, although the principle is similar, the different acoustic transfer impedance between source and receiver leads to a different formula for calculating the device sensitivities.

NOTE 2 This method is a primary calibration method and does not rely on the use of another acoustic reference **transducer**. The acoustic calibrations are traceable to primary standards of electrical measurement, length measurement, and frequency measurement.

NOTE 3 Each measurement configuration involves the deployment of a **transducer** pair in water. This is often accomplished using two positioning stages or mounts for alignment, with **transducers** paired off in the sequence shown in Figure 1. However, it is also possible to position all three in the test tank simultaneously. One arrangement is a co-linear configuration (see Figure 2). Alternatively, the **transducers** can be positioned in a triangular geometric configuration (typically in an equilateral triangle). In arrangements where all devices are immersed simultaneously, the **transducers** are configured to be capable of being turned to enable their reference directions to be aligned before each transfer impedance is measured. Note that if three devices are immersed simultaneously, there is a possibility of scattered sound from one device causing acoustic interference during the measurements made with the other two devices. In such cases, the device not being used is removed from the water during measurement of the electrical transfer impedances between the other two devices.

8.2 Calibration to determine sensitivity modulus (without phase)

8.2.1 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

8.2.2 Separation distance

The distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be decided and measured according to the requirements of 5.6.5.

In choosing the separation distance the requirements of acoustic free-field conditions (5.2), and **acoustic far-field** conditions (5.3) shall be met.

It is recommended that each repeated calibration be conducted at a different separation distance (8.2.7).

NOTE For simplicity, the separation distances between the devices for each stage of the measurements shown in Figure 1 are sometimes chosen to be identical, but this is not necessary.

8.2.3 Transducer preparation, mounting and alignment

Before commencing the measurements, the requirements for soaking (7.1) and wetting (7.2) of the **transducers** shall be met.

For each measurement of electrical transfer impedance, the requirements for **transducer** mounting (5.6.3) and **transducer** alignment (5.6.4) shall be met.

8.2.4 Signal type

The **signal** type shall be chosen in accordance with 6.1.

8.2.5 Measurement of electrical transfer impedance

For each measurement configuration illustrated in Figure 1, at each acoustic frequency the **electrical transfer impedance** shall be determined by measuring the **hydrophone** voltage in accordance with 6.3 and the **projector** drive current in accordance with 6.4. Both the voltage and current shall be expressed in the same metric (for example, both as peak quantities, or both as root-mean-square quantities).

NOTE 1 For highest accuracy, the **projector** drive current can be measured through the same measuring channel as the **hydrophone** voltage (the measuring channel consists of an amplifier, filter, and digitizer). In this case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration since only ratios of electrical quantities are required.

NOTE 2 If required, a calibrated attenuator can be used to equalize the voltage representing the **projector** current with the **hydrophone** voltage. This will minimize errors due to non-linearity in the measuring channel.

NOTE 3 If very high acoustic frequencies are used, each **electrical transfer impedance** is corrected for loss due to sound absorption by water. Further details are given in 5.8.1 and in Annex E.

8.2.6 Calculation of the receive sensitivities

At each acoustic frequency, the modulus of the **free-field receive sensitivity** $\underline{M}_H$ of the **hydrophone** shall be calculated from Formula (11):

$$|\underline{M}_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|\underline{Z}_{PH}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PT}|}} \quad (11)$$

At each acoustic frequency, the modulus of the **free-field receive sensitivity** $\underline{M}_T$ of the **reciprocal transducer** shall be calculated from Formula (12):

$$|\underline{M}_T| = \sqrt{\frac{2d_2d_3}{\rho f d_1} \frac{|\underline{Z}_{PT}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PH}|}} \quad (12)$$

If the **projector** is reciprocal, its modulus of free-field sensitivity shall be calculated from the relationship given by Formula (12) with the subscript PT replaced by TP, and distance d_2 replaced by d_4 .

NOTE If the **projector** is not reciprocal, then its calculated receive sensitivity has no physical meaning.

8.2.7 Calculation of the transmit sensitivities

At each acoustic frequency, the modulus of the **transmitting response to current** $\underline{S}_{I,P}$ of the **projector** (P) shall be calculated from Formula (13):

$$|\underline{S}_{I,P}| = \sqrt{\frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{|\underline{Z}_{PH}| |\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{TT}|}} \quad (13)$$

The **transmitting response to current** $\underline{S}_{I,T}$ of the **transducer** (T) shall be calculated from Formula (14):

$$|\underline{S}_{I,T}| = \sqrt{\frac{\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{|\underline{Z}_{PT}| |\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PH}|}} \quad (14)$$

If required, the **projector** or **transducer** transmitting voltage response ($\underline{S}_V$) shall be calculated from Formula (15):

$$\underline{S}_V = \frac{\underline{S}_I}{\underline{Z}_P} \quad (15)$$

where $\underline{Z}_P$ is the measured device electrical impedance (see Annex B).

If the **hydrophone** H is reciprocal, the modulus of its **transmitting response to current** $|\underline{S}_H|$ shall be calculated by use of Formula (14) with the $|\underline{Z}_{PH}|$ replaced by $|\underline{Z}_{PT}|$, $|\underline{Z}_{PT}|$ replaced by $|\underline{Z}_{PH}|$, and distance d_2 replaced by d_4 .

NOTE The transmitting response has no physical meaning where the **transducer** cannot be used as a sound source. An example is a **hydrophone** with an integral preamplifier, which precludes its use as a **projector**.

8.2.8 Repeatability

The calibration shall be repeated several times and the mean of the results at each frequency shall be used as the final value of sensitivity. The repeated calibrations shall be fully independent, with the **transducers** removed from the water and remounted between each calibration.

The standard deviation shall be determined and used in the calculation of uncertainties, see Annex F.

It is recommended that at least four repeated measurements are made.

NOTE 1 If a different separation distance is used for some of the repeated calibrations, this will be of assistance in assessing some of the assumptions in the method (free-field conditions, spherical-wave field, etc.) since the sensitivity is invariant with separation distance for spherically-spreading wave in free-field conditions (with corrections made for absorption by water at high frequencies).

NOTE 2 Lack of good repeatability indicates a problem with the calibration. Causes can include poor **signal-to-noise** ratio, the presence of acoustic reflections, poor precision with positioning and alignment, poor temporal stability in the performance of the acoustic **transducers** or instrumentation. With care, it is possible to achieve standard deviations as low as 1 % for **hydrophones** over their operating range.

8.2.9 Verification and checks

8.2.9.1 Reciprocity verification

The assumption that at least one **transducer** is reciprocal shall be verified.

The reciprocity of a pair of reciprocal **transducers** shall be verified by comparison of the **electrical transfer impedance** magnitudes when the functions of the transmitter and receiver are interchanged without altering the **transducer** positions (i.e., by comparing $|Z|_{PT}$ and $|Z|_{TP}$ where both P and T are reciprocal) [3], [4], [40].

If large discrepancies between $|Z|_{PT}$ and $|Z|_{TP}$ occur, this can be because one (or both) **transducers** is driven too hard resulting in non-linear behaviour. In this case, the amplitude of the drive **signal** to the **transducers** shall be reduced and the transfer impedance check repeated. However, if such a reduction in drive **signal** results in unacceptably low **signal**-to-noise ratio, consideration shall be given to the use of alternative **transducers**.

For the lowest uncertainty in reciprocity calibrations, the reciprocal **transducers** should be used within their normal operating band (typically up to 0,7 times the frequency of the first resonance for a piezoelectric **transducer**).

Use of a **transducer** at frequencies outside its linear dynamic range or operating frequency range (for example, at frequencies much greater than the resonance frequency) can result in non-reciprocal behaviour and degradation in the accuracy of the calibration. Calibration of a **hydrophone** over a broad frequency range can require the use of several different reciprocal **transducers** to cover the complete range with sufficiently small uncertainty.

NOTE 1 It is not possible to determine whether a **transducer** is reciprocal without using it in combination with another **transducer**. The check described above provides a good indication that a pair of **transducers** are reciprocal.

NOTE 2 For well-behaved **transducers** used within their operating frequency range, it is possible to obtain agreement between the electrical transfer impedances of better than 3 %.

NOTE 3 Disagreement of greater than 10 % indicates that at least one of the **transducers** might not be behaving in a reciprocal manner. The use of a third **reversible transducer** in the reciprocity verification can reveal which of the **transducers** is non-reciprocal. In a reciprocity calibration, non-reciprocal **transducers** can only be used as a **projector** or **hydrophone** (as appropriate), but not as the **transducer**, T.

NOTE 4 If the **transducers** in the reciprocity verification check are identical in construction, they can be nonlinear to the same extent and still appear reciprocal. Therefore, the reciprocity verification is ideally performed using **transducers** of different model, dimensions or construction.

NOTE 5 A better statistical accuracy is obtained from the calibration if more than one **transducer** is reciprocal. If the **projector** can also be used as a **hydrophone**, the **hydrophone** sensitivity M_H can be determined in two ways: with either $|Z|_{PT}$ or $|Z|_{TP}$ on the denominator of Formula (11). The uncertainty of the mean of the two values of sensitivity will be lower than that of either value alone.

NOTE 6 If the calibration is performed with more than three **transducers** and if two or more are reciprocal, the uncertainty is reduced because the sensitivity can be calculated several times, using independent results from different combinations of **transducers**. The mean value of all results at the same frequency possesses a lower statistical uncertainty than each value alone.

8.2.9.2 Spherical-wave verification

Consideration shall be given to the deviation from the assumed spherical-wave field, and the influence of any deviation shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty.

In ideal conditions, it is possible to obtain deviation of less than ± 2 %. Variation of greater than ± 5 % indicates additional problems (e.g. from boundary reflections). In such cases, investigate further to ascertain the cause.

When operating at frequencies of high hundreds of kilohertz, corrections will be required to the **electrical transfer impedance** to account for absorption of sound by water (see 5.8.1 and Annex E).

NOTE 1 The existence of a spherically-spreading acoustic field can be verified by comparison of the **electrical transfer impedance** magnitudes when the distance between **projector** and **hydrophone** is varied. See Annex E. If the **hydrophone** is placed in the far-field of the **projector**, the transfer impedance is inversely proportional to the distance d between the reference centres of the **projector** and the **hydrophone**:

$$|Z_{PH}| d = \text{constant} \quad (16)$$

8.2.9.3 Linearity verification

The measured **signals** shall be checked for distortion during the calibrations. If there is any doubt regarding the linearity of the **transducers**, the linearity of each pair of **transducers** shall be verified by comparing the magnitudes of the **electrical transfer impedance** at different values of the **projector** current within the dynamic range of the system, at a specific frequency. Starting at a level of 6 dB higher than the background noise level up to the highest level that will be used, the magnitude of the transfer impedance shall remain constant within 5 %.

Take care that during the actual calibration, the **signal** levels are kept within the range of linearity. As this range can be different for each pair of **transducers**, careful observation of the **signal** levels is necessary.

NOTE Distortion can manifest itself by the presence of higher harmonics in the **signal**, evident from an inspection of the spectral levels. Ideally, any harmonics will be more than 10 dB lower in amplitude than the fundamental.

8.2.9.4 Inclusion of calibrated reference transducers in the transducer triad

If one or more of the **transducers** used in the calibration are reference **transducers** with sensitivity known from previous calibrations, good agreement obtained with the known values of sensitivity for the reference devices will provide extra confidence in the results for the **transducer** under test.

NOTE In a reciprocity calibration, absolute sensitivities are obtained for all three **transducers** used in the triad. There is no requirement to rely on the sensitivity of one **transducer** when calibrating another. However, if the aim of the calibration is to derive the sensitivity of a specific **transducer** of unknown performance, the use of calibrated reference **transducers** as the other devices in the **transducer** triad can provide an extra check on the accuracy of the results for the **transducers** under test (assuming stability for the reference **transducers**).

8.2.10 Uncertainty

If conducted with care and in accordance with above procedures, the expanded uncertainty (95 % confidence level) shall be in the range 4 % to 10 %.

NOTE The evaluation of uncertainty for the free-field reciprocity calibration method involves many components (see Annex F for details) [40] to [43].

8.3 Calibration to determine phase of the hydrophone sensitivity

8.3.1 General principle

For determination of the phase angle of the **hydrophone** sensitivity, the measurement configuration adopted shall be the co-linear arrangement depicted in Figure 2 [44] to [46]. This arrangement is designed to minimize phase errors due to positioning errors. In the arrangement, the three **transducers** P, T and H are mounted in a straight line with H located between P and T such that $d_2 = d_1 + d_3$.

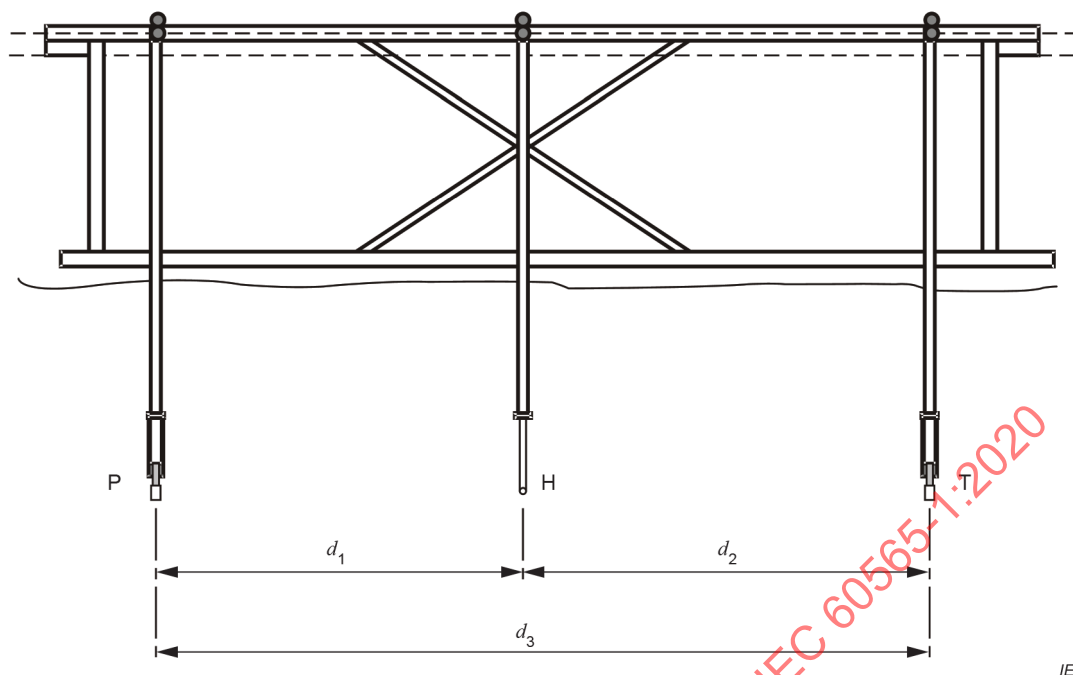


Figure 2 – Measurement framework for supporting in-line the three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated

Measurements shall be made as follows.

Mount the **transducers** as shown in Figure 2 with their reference centres separated by the distances d_1 , d_2 and d_3 , where $d_2 = d_1 + d_3$.

Align their reference directions with P pointing toward H and T. Determine the complex **electrical transfer impedance** $\underline{Z}_{PH}$ from the input current to P and the output voltage from H.

Remove the **hydrophone** with its hanger from the framework. Determine the complex **electrical transfer impedance** $\underline{Z}_{PT}$ from the input current to P and the output voltage from T.

Replace the **hydrophone** with its hanger in the framework and rotate about its reference centre so that T now points toward H and the distance d_3 is maintained between the reference centres of H and T. Determine the complex **electrical transfer impedance** $\underline{Z}_{TH}$ from the input current to T and the output voltage from H.

Calculate the modulus and phase angle of the free-field sensitivity of the **hydrophone** according to the instructions in 8.3.6 using the measured electrical transfer impedances [44] to [46].

NOTE 1 The difficulty of determining the phase of $\underline{M}_H$ by this method lies in accurately determining both the sound speed and the measurement distances d_1 , d_2 and d_3 . For example, at 100 kHz in water, an error of only 1,0 mm in any one of the distances gives a phase error of about 12° [45].

NOTE 2 The resulting sensitivity is representative of both the **hydrophone** and its mount.

NOTE 3 The calibration is ideally performed using the same mount that will support the **hydrophone** when it is used for field measurements.

8.3.2 Transducer preparation

Before commencing the measurements, the requirements for soaking (7.1) and wetting (7.2) of the **transducers** shall be met.

8.3.3 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

8.3.4 Signal type

The **signal** type shall be in accordance with 6.1.

8.3.5 Transducer mounting and alignment

The distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be decided and measured according to the requirements of 5.6.5.

In the choosing the separation distance the requirements of acoustic free-field conditions (5.2), and **acoustic far-field** conditions (5.3) shall be met.

8.3.6 Measurement of electrical transfer impedance

For each measurement configuration illustrated in Figure 1, at each acoustic frequency the complex-valued **electrical transfer impedance** shall be determined by measuring the **hydrophone** voltage in accordance with 6.3 and the **projector** drive current in accordance with 6.4.

Each complex **electrical transfer impedance** (for example, Z_{PH}) shall be measured (see 3.2) and calculated from:

$$Z_{PH} = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} \quad (17)$$

NOTE 1 For highest accuracy, the **projector** drive current can be measured through the same measuring channel as the **hydrophone** voltage (the measuring channel consists of an amplifier, filter, and digitizer). In this case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration since only ratios of electrical quantities are required.

NOTE 2 If required, a calibrated attenuator can be used to equalize the voltage representing the **projector** current with the **hydrophone** voltage. This will minimize errors due to non-linearity in the measuring channel.

NOTE 3 If very high acoustic frequencies are used, each **electrical transfer impedance** can be corrected for loss due to sound absorption by water. Further details are given in 5.8.1 and in Annex E.

8.3.7 Calculation of sensitivity phase angle

At each acoustic frequency, the complex-valued **free-field receive sensitivity** $\underline{M}_H$ of the **hydrophone** shall be calculated from:

$$\underline{M}_H = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{j\rho f d_2} \frac{Z_{PH}Z_{TH}}{Z_{PT}}} \quad (18)$$

The modulus alone of the sensitivity $|\underline{M}|_H$ can be calculated from:

$$|\underline{M}_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}||Z_{TH}|}{|Z_{PT}|}} \quad (19)$$

The phase angle alone of the sensitivity, θ_H , can be calculated from:

$$\theta_H = \frac{1}{2} \left(\Delta\theta_{PH} + \Delta\theta_{TH} - \Delta\theta_{PT} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (20)$$

where θ_{PH} is the phase angle of Z_{PH} , etc [45].

NOTE Since the distances and sound speed do not appear explicitly in a phase term in Formula (18), the accuracy of the calculated phase of M_H is only limited by accuracy of the phase measurements of the voltages and currents and by positioning. A special measurement framework that can minimize positioning errors is illustrated by Figure 2.

8.3.8 Repeatability

The calibration shall be repeated several times and the mean of the results at each frequency shall be used as the final value of sensitivity. The repeated calibrations shall be fully independent, with the **transducers** removed from the water and remounted between each calibration.

The standard deviation shall be determined and used in the calculation of uncertainties, see Annex F.

It is recommended that at least four repeated measurements are made.

NOTE 1 If a different separation distance is used for some of the repeated calibrations, this will be of assistance in assessing some of the assumptions in the method (free-field conditions, spherical-wave field, etc.) since the sensitivity is invariant with separation distance for spherically-spreading wave in free-field conditions (with corrections made for absorption by water at high frequencies).

NOTE 2 Lack of good repeatability indicates a problem with the calibration. Causes can include poor **signal**-to-noise ratio, the presence of acoustic reflections, poor precision with positioning and alignment, poor temporal stability in the performance of the acoustic **transducers** or instrumentation. With care, it is possible to achieve standard deviations as low as 1 % for **hydrophones** over their operating range.

8.3.9 Verification and checking

The verification checks for reciprocal behaviour shall be undertaken in accordance with 8.2.9.1.

The spherical-wave field checks shall be undertaken in accordance with 8.2.9.2.

The **transducer** linearity checks shall be undertaken in accordance with 8.2.9.3.

If possible, **transducers** with a known sensitivity shall be included in the **transducer** triad in accordance with 8.2.9.4.

8.3.10 Uncertainty

Under good conditions with precise positioning, it is possible to obtain an overall expanded uncertainty of less than 5° in phase for frequencies up to 50 kHz, rising to 10° in phase for frequencies up to 100 kHz, and rising to 20° in phase for frequencies up to 300 kHz [44] to [46].

NOTE 1 The evaluation of uncertainty involves many components (see Annex F).

NOTE 2 For a discussion of ways to reduce the uncertainty of phase measurement caused by inaccuracy in the distance between the acoustic centres of the **hydrophone** and the **projector**, as well as determining the displacement of the acoustic centre relative to the reference centre, see reference [46].

9 Free-field calibration by comparison with an acoustic reference device

9.1 Principles

The calibration of **hydrophones** or **projectors** in free-field conditions can be accomplished by use of a reference acoustic **transducer** which has previously been subject to an absolute

calibration. Such a calibration requires the use of either a calibrated **hydrophone** or a calibrated **projector** [3] to [6].

NOTE Calibration by a comparison method will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference device will inevitably introduce an extra Type B component of uncertainty. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex F.

9.2 Types of comparison calibration method

9.2.1 Hydrophone calibration using a calibrated reference hydrophone

The sound field generated by an auxiliary **projector** in water is measured at a point in the **acoustic far-field** with a calibrated reference **hydrophone**. The reference **hydrophone** is then replaced by the **hydrophone** under test. The ratio of the open circuit voltages of the two **hydrophones** is equal to the ratio of their free-field sensitivities, enabling the **free-field receive sensitivity** of the **hydrophone** under test to be determined. The auxiliary **projector** need not be calibrated, and needs to be stable only for the duration of the calibration.

9.2.2 Hydrophone calibration using calibrated reference projector

The sound field generated in water by a calibrated reference **projector** is measured by the **hydrophone** under test at a point in the **acoustic far-field**. The free-field sensitivity of that **hydrophone** is determined from measurement of the open circuit voltage of the **hydrophone**, the **projector-hydrophone** separation distance, the transmit sensitivity of the calibrated **projector**, and the electrical drive **signal** applied to the **projector**. For the calibrated **projector**, either the **transmitting response to current** or the **transmitting response to voltage** can be used, requiring the measurement of the electrical drive current or drive voltage, respectively.

9.2.3 Projector calibration using a calibrated reference hydrophone

The sound field generated in water by the **projector** under test is measured by a calibrated reference **hydrophone** at a point in the **acoustic far-field**. The free-field transmit sensitivity of the **projector** is determined from measurement of the open circuit voltage of the **hydrophone**, the **projector-hydrophone** separation distance, the **free-field receive sensitivity** of the calibrated reference **hydrophone**, and the electrical drive **signal** applied to the **projector**. For the **projector**, either **transmitting response to current** or the **transmitting response to voltage** can be determined, requiring the measurement of the electrical drive current or drive voltage, respectively.

9.3 Hydrophone calibration by comparison with a reference hydrophone

9.3.1 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

9.3.2 Separation distance

The distance between the auxiliary **projector** and the **hydrophone** shall be decided and measured according to the requirements of 5.6.5.

In the choosing the separation distance the requirements of acoustic free-field conditions (5.2), and **acoustic far-field** conditions (5.3) shall be met.

It is recommended that each repeated calibration be conducted at a different separation distance.

NOTE A distance smaller than that required for free-field conditions can be acceptable when the **hydrophone** under test is compared with a calibrated **hydrophone** at the same place in the sound field. This is possible when the two **hydrophones** are exposed to the same acoustic pressure and neither **hydrophone** responds to acoustic pressure

gradients. To achieve this, the two **hydrophones** will be essentially identical (or very similar) in structure and size, or both will have dimensions less than an acoustic wavelength [4].

9.3.3 Transducer preparation, mounting and alignment

Before commencing the measurements, the requirements for soaking (7.1) and wetting (7.2) of the **transducers** shall be met.

For each measurement of electrical transfer impedance, the requirements for **transducer** mounting (5.6.3) and **transducer** alignment (5.6.4) shall be met.

9.3.4 Signal type

The **signal** type shall be chosen in accordance with 6.1.

9.3.5 Measurement of electrical voltage

For both the **hydrophone** under test and the reference **hydrophone**, the **hydrophone** voltage shall be measured in accordance with 6.3. Both voltages shall be expressed in the same metric (for example, both as peak voltages, or both as root-mean-square voltages).

During the measurements, as a check on the stability of the source **transducer** between measurement runs, the **projector** drive current shall be measured in accordance with 6.4.

NOTE 1 For highest accuracy, the **hydrophone** voltages can be measured through the same measurement channel (the measuring channel consists of an amplifier, filter, and digitizer). In this case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration since only ratios of electrical quantities are required.

NOTE 2 If required, a calibrated attenuator can be used to equalize the voltages. This will minimize errors due to non-linearity in the measuring channel.

9.3.6 Free-field sensitivity

The modulus of the **free-field receive sensitivity** of the **hydrophone** under test, $|\underline{M}_H|$, shall be calculated from the ratio of the open-circuit voltages of the **hydrophone** under test, U_H , and the reference **hydrophone**, U_R , and the sensitivity of the calibrated reference **hydrophone**, $|\underline{M}_R|$, according to the following:

$$|\underline{M}_H| = \frac{U_H}{U_R} |\underline{M}_R| \quad (21)$$

9.3.7 Repeatability

The calibration shall be repeated several times and the mean of the results at each frequency shall be used as the final value of sensitivity. The repeated calibrations shall be fully independent, with the **transducers** removed from the water and remounted between each calibration.

The standard deviation shall be determined and used in the calculation of uncertainties, see Annex F.

It is recommended that at least four repeated measurements are made. If two different reference **hydrophones** are used, it is recommended that each is utilized for two of the repeats.

NOTE 1 If a different separation distance is used for some of the repeated calibrations, this will be of assistance in assessing some of the assumptions in the method (free-field conditions, spherical-wave field, etc.) since the sensitivity is invariant with separation distance for spherically-spreading wave in free-field conditions (with corrections made for absorption by water at high frequencies).

NOTE 2 Lack of good repeatability indicates a problem with the calibration. Causes can include poor **signal**-to-noise ratio, the presence of acoustic reflections, poor precision with positioning and alignment, poor temporal stability in the performance of the acoustic **transducers** or instrumentation. With care, it is possible to achieve standard deviations as low as 1 % for **hydrophones** over their operating range.

9.3.8 Verification and checks

The measured **signals** shall be checked for distortion during the calibrations. If there is significant distortion present, the drive level of the **projector** shall be reduced.

The use of two different reference **hydrophones** for the repeated measurement runs will mitigate the risk of temporal instability in the sensitivity of the reference **hydrophone** since its last primary calibration.

In order to mitigate the possibility of the reference **hydrophone** changing sensitivity since its last absolute calibration, it is recommended that two different reference **hydrophones** be used for different repeated calibrations. The sensitivities calculated will be the same when using either reference **hydrophone**. The degree to which the results disagree provides an indication of the stability of the two reference **hydrophones** (it is highly unlikely that both **hydrophones** would change sensitivity by the same amount).

Take care that during the actual calibration, the **signal** levels are kept within the range of linearity.

NOTE 1 Distortion can manifest itself by the presence of higher harmonics in the **signal**, evident from an inspection of the spectral levels. Ideally, any harmonics will be more than 10 dB lower in amplitude than the fundamental.

NOTE 2 If the calibrated reference **hydrophone** is used under significantly different environmental conditions to those used during its primary calibration, this can cause a change in the sensitivity and add to the calibration uncertainty. Environmental conditions that are relevant include the depth of immersion and water temperature.

9.3.9 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. With care and when using **hydrophones** within their main operating range, an overall uncertainty (95 % confidence levels) can be achieved which is in the range 7 % to 15 %.

NOTE **Hydrophone** calibration by a comparison method will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference **hydrophone** will inevitably introduce a large Type B component of uncertainty [43]. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex F.

9.4 Hydrophone calibration using a calibrated projector

9.4.1 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

9.4.2 Separation distance

The distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be decided and measured according to the requirements of 5.6.5.

In the choosing the separation distance the requirements of acoustic free-field conditions (5.2), and **acoustic far-field** conditions (5.3) shall be met.

It is recommended that each repeated calibration be conducted at a different separation distance.

The **projector** might itself have been calibrated at a certain distance or within a given range of distances. If so, it is recommended that these separation distances are used for this calibration also.

9.4.3 Transducer preparation, mounting and alignment

Before commencing the measurements, the requirements for soaking (7.1) and wetting (7.2) of the **transducers** shall be met.

For each measurement of electrical transfer impedance, the requirements for **transducer** mounting (5.6.3) and **transducer** alignment (5.6.4) shall be met.

9.4.4 Signal type

The **signal** type shall be chosen in accordance with 6.1.

If the **projector** has been calibrated with a specific type of **signal**, it is recommended to use the same type when that **projector** acts as a calibrated sound source.

9.4.5 Measurement of electrical transfer impedance

At each acoustic frequency, the **electrical transfer impedance** shall be determined by measuring the **hydrophone** voltage in accordance with 6.3 and the **projector** drive current in accordance with 6.4. Both the voltage and current shall be expressed in the same metric (for example, both as peak quantities, or both as root-mean-square quantities).

NOTE 1 For highest accuracy, the **projector** drive current can be measured through the same measuring channel as the **hydrophone** voltage (the measuring channel consists of an amplifier, filter, and digitizer). In this case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration since only ratios of electrical quantities are required.

NOTE 2 If required, a calibrated attenuator can be used to equalize the voltage representing the **projector** current with the **hydrophone** voltage. This will minimize errors due to non-linearity in the measuring channel.

NOTE 3 If very high acoustic frequencies are used, each **electrical transfer impedance** can be corrected for loss due to sound absorption by water. Further details are given in 5.8.1 and in Annex E.

9.4.6 Calculation of the receive sensitivities

With the measured values of d , U_{PH} , I_P , and with the known transmit current sensitivity $\underline{S}_{I,P}$ of the calibrated **projector**, the modulus of the **free-field receive sensitivity** $|\underline{M}_H|$ of the **hydrophone** shall be calculated with the following formula:

$$|\underline{M}_H| = \frac{d U_{PH}}{|\underline{S}_{I,P}| I_P} = \frac{d |\underline{Z}_{PH}|}{|\underline{S}_{I,P}|} \quad (22)$$

9.4.7 Repeatability

The calibration shall be repeated several times and the mean of the results at each frequency shall be used as the final value of sensitivity. The repeated calibrations shall be fully independent, with the **transducers** removed from the water and remounted between each calibration.

The standard deviation shall be determined and used in the calculation of uncertainties, see Annex F.

It is recommended that at least four repeated measurements are made.

NOTE 1 If a different separation distance is used for some of the repeated calibrations, this will be of assistance in assessing some of the assumptions in the method (free-field conditions, spherical-wave field, etc.) since the sensitivity is invariant with separation distance for spherically-spreading wave in free-field conditions (with corrections made for absorption by water at high frequencies).

NOTE 2 Lack of good repeatability indicates a problem with the calibration. Causes can include poor **signal**-to-noise ratio, the presence of acoustic reflections, poor precision with positioning and alignment, poor temporal stability

in the performance of the acoustic **transducers** or instrumentation. With care, it is possible to achieve standard deviations as low as 1 % for **hydrophones** over their operating range.

9.4.8 Verification and checks

The measured **signals** shall be checked for distortion during the calibrations. If there is significant distortion present, the drive level of the **projector** shall be reduced.

As far as possible, the calibrated **projector** shall be used in the manner and conditions that pertained to its primary calibration.

The use of a calibrated reference **hydrophone** to check the **projector** performance will mitigate the risk of temporal instability in the sensitivity of the **projector** since its last primary calibration.

NOTE 1 Take care that during the actual calibration, the **signal** levels are kept within the range of linearity. Distortion can manifest itself by the presence of higher harmonics in the **signal**, evident from an inspection of the spectral levels. Ideally, any harmonics will be more than 10 dB lower in amplitude than the fundamental.

NOTE 2 The calibrated reference **projector** will ideally be used under operating conditions to those used during its primary calibration. These conditions include a similar applied drive voltage; and similar separation distance and a similar mounting configuration.

NOTE 3 If the calibrated reference **projector** is used under significantly different environmental conditions to those used during its primary calibration, this can cause a change in the sensitivity and add to the calibration uncertainty. Environmental conditions that are relevant include the depth of immersion and water temperature.

NOTE 4 As a check on the stability of the **projector** sensitivity (since its last primary calibration), a calibrated **hydrophone** can be used to measure the sound field produced by the **projector**.

9.4.9 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. With care and when using **hydrophones** within their main operating range, an overall uncertainty (95 % confidence levels) can be achieved which is in the range 10 % to 20 %.

NOTE **Hydrophone** calibration by use of a standard **projector** will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference **projector** will inevitably introduce a large component of uncertainty. The stability of the **projector** and the potential lack of free-field conditions can also contribute to overall uncertainty [39]. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex F.

9.5 Projector calibration using a calibrated hydrophone

9.5.1 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), far-field conditions (5.3) and steady-state conditions (5.4) shall be met.

9.5.2 Separation distance

The distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be decided and measured according to the requirements of 5.6.5.

In the choosing the separation distance the requirements of acoustic free-field conditions (5.2), and **acoustic far-field** conditions (5.3) shall be met.

It is recommended that each repeated calibration be conducted at a different separation distance.

9.5.3 Transducer preparation, mounting and alignment

Before commencing the measurements, the requirements for soaking (7.1) and wetting (7.2) of the **transducers** shall be met.

For each measurement of **electrical transfer impedance**, the requirements for **transducer** mounting (5.6.3) and **transducer** alignment (5.6.4) shall be met.

9.5.4 Signal type

The **signal** type shall be chosen in accordance with 6.1.

9.5.5 Measurement of electrical transfer impedance

At each acoustic frequency, the **electrical transfer impedance** shall be determined by measuring the **hydrophone** voltage in accordance with 6.3 and the **projector** drive current in accordance with 6.4. Both the voltage and current shall be expressed in the same metric (for example, both as peak quantities, or both as root-mean-square quantities).

NOTE 1 For highest accuracy, the **projector** drive current can be measured through the same measuring channel as the **hydrophone** voltage (the measuring channel consists of an amplifier, filter, and digitizer). In this case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration since only ratios of electrical quantities are required.

NOTE 2 If required, a calibrated attenuator can be used to equalize the voltage representing the **projector** current with the **hydrophone** voltage. This will minimize errors due to non-linearity in the measuring channel.

NOTE 3 If very high acoustic frequencies are used, each **electrical transfer impedance** can be corrected for loss due to sound absorption by water. Further details are given in 5.8.1 and in Annex E.

9.5.6 Calculation of the transmit sensitivity

With the measured values of d , U_{PH} , I_P , and with the known free-field sensitivity $|\underline{M}_H|$ of the **hydrophone**, the modulus of the **transmitting response to current** $|\underline{S}_{I,P}|$ of the **projector** shall be calculated with the following formula:

$$|\underline{S}_{I,P}| = \frac{d U_{PH}}{|\underline{M}_H| I_P} = \frac{d |\underline{Z}_{PH}|}{|\underline{M}_H|} \quad (23)$$

For calibration of the **projector** in terms of the measured electrical drive voltage, V_P , the modulus of the **transmitting response to voltage** $|\underline{S}_{V,P}|$ is calculated from:

$$|\underline{S}_{V,P}| = \frac{d U_{PH}}{|\underline{M}_H| V_P} \quad (24)$$

9.5.7 Verification and checks

The measured **signals** shall be checked for distortion during the calibrations. If there is significant distortion present, the drive level of the **projector** shall be reduced.

As far as possible, the **projector** shall be calibrated in the manner and conditions that will pertain to its intended use in the field.

The use of two different reference **hydrophones** for the repeated measurement runs will mitigate the risk of temporal instability in the sensitivity of the reference **hydrophone** since its last primary calibration.

Take care that during the actual calibration, the **signal** levels are kept within the range of linearity. Distortion can manifest itself by the presence of higher harmonics in the **signal**, evident from an inspection of the spectral levels. Ideally, any harmonics should be more than 10 dB lower in amplitude than the fundamental.

The **projector** under test will ideally be calibrated using a similar applied drive voltage, separation distance and mounting configuration that will pertain to its intended use in the field.

If the calibrated reference **hydrophone** is used under significantly different environmental conditions to those used during its primary calibration, this can cause a change in the sensitivity and add to the calibration uncertainty. Environmental conditions that are relevant include the depth of immersion, water temperature and mounting configuration.

In order to mitigate the possibility of the reference **hydrophone** changing sensitivity since its last absolute calibration, it is recommended that two different reference **hydrophones** be used for different repeated calibrations. The **projector** transmit sensitivities calculated will be the same when using either reference **hydrophone**. The degree to which the results disagree provides an indication of the stability of the two reference **hydrophones** (it is highly unlikely that both **hydrophones** would change sensitivity by the same amount).

9.5.8 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. With care and when using **transducers** within their main operating range, an overall uncertainty (95 % confidence levels) can be achieved which is in the range 10 % to 20 %.

NOTE Calibration of a **projector** will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference **hydrophone** will inevitably introduce a large component of uncertainty. The potential lack of free-field conditions can also contribute to overall uncertainty to a greater degree than for **hydrophone** calibration. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex F.

10 Reporting of results

10.1 Sensitivity

The results for **projector** or **hydrophone** sensitivity shall be reported for each acoustic frequency of measurement.

The results for **free-field receive sensitivity** of a **hydrophone** shall be reported in units of volts per pascal (V/Pa).

The results for the transmit current response (TCR) of a **projector** shall be reported in units of pascal metre per ampere, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

The results for transmit voltage response (TVR) of a **projector** shall be reported in units of pascal metre per volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

Any allowed multiplier within the SI system of quantities and units is acceptable (for example, a common variant for **free-field receive sensitivity** in the underwater acoustics field is $\mu\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$).

10.2 Sensitivity level

If the results for **projector** or **hydrophone** sensitivity are required to be expressed as a level, they shall be reported for each acoustic frequency of measurement.

The results for the **free-field receive sensitivity level** of a **hydrophone** shall be reported in units of decibels, with a reference value equal to $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

The results for the transmit current response level of a **projector** shall be reported in units of decibels, with a reference value equal to $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

The results for the transmit voltage response level of a **projector** shall be reported in units of decibels, with a reference value equal to $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

It is recommended that the sensitivity is included in SI units alongside the sensitivity level.

10.3 Calibration uncertainties

The calibration uncertainty shall be reported alongside the sensitivity, and shall be expressed as an expanded uncertainty for a coverage factor $k = 2$.

The uncertainty shall be evaluated in conformance with ISO/IEC Guide 98-3 [43]. See Annex F for guidance on sources of uncertainty in calibration of **hydrophones** and **projectors**.

NOTE The calibration uncertainty is ideally expressed as a relative uncertainty as a percentage.

10.4 Auxiliary metadata

Any calibration is only valid on the date of calibration and for the environmental conditions which existed during the calibration. When the result of the calibration of a **hydrophone** is reported, the environmental conditions that pertain to that calibration shall be stated, including all those conditions that can influence the sensitivity of the device [9], [47] to [51].

Conditions that shall be reported are:

- date of the calibration;
- water temperature;
- depth of immersion;
- type of mount or rigging used;
- length of soaking time and wetting procedure used;
- orientation of the **transducer** about any axis or alignment mark;
- alignment method (manually or acoustically aligned).

NOTE Other conditions that can need to be reported include:

- maximum acoustic pressure experienced by the **hydrophone**;
- separation distances used in the calibration;
- electrical drive voltages and/or currents;
- water (fresh water or sea water);
- any assumptions made about the device under test (e.g. the position of the reference centre).

11 Recalibration periods

Reference **hydrophones** used for absolute measurements shall be calibrated periodically in order to maintain a valid calibration status. An appropriate period between calibrations shall be chosen after consideration of the use that is made of the **hydrophone** and the likelihood for damage to the device.

NOTE 1 For reference **hydrophones**, which are used purely for calibration purposes, an annual recalibration is appropriate. Where **hydrophones** are used in the field and potentially could be subjected to abuse, calibrations are typically undertaken at shorter intervals (see IEC 60500:2017).

NOTE 2 The decision on the appropriate recalibration period depends upon the risk of any unobserved change to the sensitivity of the **hydrophone** or **projector**. If, during the period between full primary calibrations, other calibration checks are performed over all or part of the frequency range, then an ongoing assessment can be made of the temporal stability and the period between full calibrations can be extended. An example might be a **hydrophone** which is subject to periodic relative calibration checks by inclusion as one of the reference **hydrophones** in comparison calibrations along with another reference **hydrophone** or reference **projector** (see 9.3.8, 9.4.8 and 9.5.7). Another would be a **transducer** used over part of its frequency range in a triad for a reciprocity calibration of another **transducer** (8.2.9).

Annex A (informative)

Directional response of a hydrophone or projector

A.1 General principle

A complete determination of the performance characteristics of a **projector** or **hydrophone** should include a measurement of its **directional response** at representative frequencies above the range where it is still omnidirectional (see IEC 60500:2017, Clause 6).

The measurements require that a rotational stage be incorporated into the **transducer** support framework or positioning system, with the **transducer** mount aligned such that the **transducer** reference centre is located along the axis of rotation. The **transducer** under test (**hydrophone** or **projector**) is rotated about the axis and measurements are made of the received **signal** as a function of angle in a specified plane [3] to [6].

In practice, for efficiency and reliability, the control of the rotation stage and the **signal** acquisition is automated and under computer control.

A.2 Types of measurement implementation

Two methods of implementing the rotation are in general feasible:

a) Discrete rotation intervals

In this case, measurements are made at discrete angular intervals, with the rotation stage stopping at specified angular increments while measurements are made of the received voltage **signal** at the **hydrophone** for each known angle of rotation. This method ideally requires some form of stepper motor control. One disadvantage of this method is that it can be time-consuming. In addition, there is a disadvantage in that mechanical vibrations can occur in the **transducer** suspension system when the motion is stopped rapidly at a predetermined position. To avoid this issue, the acceleration and deceleration of the positioning system are reduced to provide a more gradual change of motion, and acoustic measurements are delayed for a time required to completely terminate any mechanical vibrations. The advantage of discrete rotation intervals is that, at each rotation angle, auto-scaling and **signal** averaging can be performed, enabling accuracy to be maintained for large fluctuations in received **signal** level (such as in nulls and for low amplitude side lobes). For highly directional **transducers** where the response varies strongly, this is desirable.

b) Continuous rotation

In this case, the rotation stage is rotated continuously but very slowly while making simultaneous measurements of the received voltage **signal** and the angle of rotation. Although the rotation is slow to enable readings of voltage and angle to be obtained, in a few minutes it is typically possible to obtain measurements at thousands of angles. The advantage of this method is increased speed compared to the discrete method. The disadvantage is that no **signal** averaging or auto-scaling is possible, which can limit the achievable uncertainty for responses of highly directional **transducers** that show high variation in received **signal** level with angle, and can also lead to greater electrical noise being apparent in the measured data. The **transducer** should be rotated slowly enough for the **signal** acquisition to pick up changes in the **signal** level around the nulls in the response. This method is best for **transducers** that exhibit a smooth **directional response** with no significant nulls, as can be obtained from small **hydrophones** at frequencies up to the resonance.

A.3 Coordinate system

The angular coordinate system chosen is that specified by IEC 60500:2017.

A.4 Acoustic field requirements

For all measurements, the requirements for acoustic free-field conditions (5.2), and steady-state conditions (5.4) shall be met.

With regard to far-field requirements, when measuring the **directional response** of a **transducer**, the distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be larger than that for a calibration on axis. The distance shall be no less than twice that given by Formula (9) or Formula (10), whichever is larger (see 5.3). See Annex D and references [3], [4], [7] to [9].

A.5 Positioning and alignment

The requirements of 5.6 shall apply.

A.6 Signal type

The **signal** type shall be chosen in accordance with 6.1.

A.7 Measurement of transducer directional response

A.7.1 Projector

With the **projector** under test and **hydrophone** deployed in the water, the **projector** is driven with a **signal** of fixed amplitude and rotated about an axis through the reference centre through the required angular range, with measurements of the received voltage **signal** made at the **hydrophone** for each known angle of rotation and at the required angular resolution. The **hydrophone** voltage is measured in accordance with 6.3.

NOTE 1 The **hydrophone** need not be calibrated.

NOTE 2 The zero degree angle is normally chosen to be the reference direction of the principal axis of the **projector**.

A.7.2 Hydrophone

With the **projector** and **hydrophone** under test deployed in the water, the **projector** is driven with a **signal** of fixed amplitude and the **hydrophone** is rotated about an axis through the reference centre through the required angular range, with measurements of the received voltage **signal** made at the **hydrophone** for each known angle of rotation and at the required angular resolution. The **hydrophone** voltage is measured in accordance with 6.3.

NOTE 1 The **projector** need not be calibrated. However, any instability in its output throughout the measurements will contribute to the measurement uncertainty.

NOTE 2 The zero degree angle is normally chosen to be the reference direction of the **hydrophone**.

A.8 Calculation of the directional response level (angular deviation loss)

The **directional response** is calculated by normalizing the response to the response at a specified reference angle. The **directional response** level $L_{D\theta}$ expressed in decibels can be calculated from:

$$L_{D\theta} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{\theta}(\theta)}{V_{\text{ref}}} \right) \text{ dB} \quad (\text{A.1})$$

where $V_{\theta}(\theta)$ is the array of voltages measured at the range of angles, θ , and V_{ref} is the reference voltage used for the normalization.

NOTE 1 The reference voltage can be measured in the **hydrophone** reference direction or direction of the principal axis of the **projector**, but is most often chosen to be the maximum value of the voltage measured at any angle. The choice of reference voltage is stated with the results if it is not obvious.

NOTE 2 For a **projector**, often the maximum **signal** is obtained on or near the **transducer** principal axis. For a small and relatively omnidirectional **hydrophone**, the chosen reference direction can be arbitrary and will not necessarily be the direction of maximum sensitivity.

A.9 Uncertainty

The uncertainty in **directional response** measurement is affected by the same quantities that limit the accuracy of the sensitivity measurement, but there are some additional limitations. A larger separation distance is generally required (see Annex F). For directional **transducers**, the level of reflections and noise should ideally be lower than for sensitivity measurement on the principal axis because of the low level of the **signals** measured at off-axis angles.

If the reference centre is not located accurately on the axis of rotation, the varying separation distance (precession) can cause errors in the phase and the amplitude of the measured **directional response**.

For omnidirectional **transducers** showing weak variation with angle, and for directional **transducers** at angles close to the maximum of the main beam, uncertainties in the **directional response** are typically about 0,5 dB (for a confidence level of 95 %). An additional uncertainty of 1 dB for each **angular deviation loss** between 10 dB and 30 dB can be expected.

A.10 Graphic representation

A **directional response** is typically presented graphically, either in the form of a two-dimensional polar plot or as a Cartesian plot [3]. Examples are shown in Figure A.1.

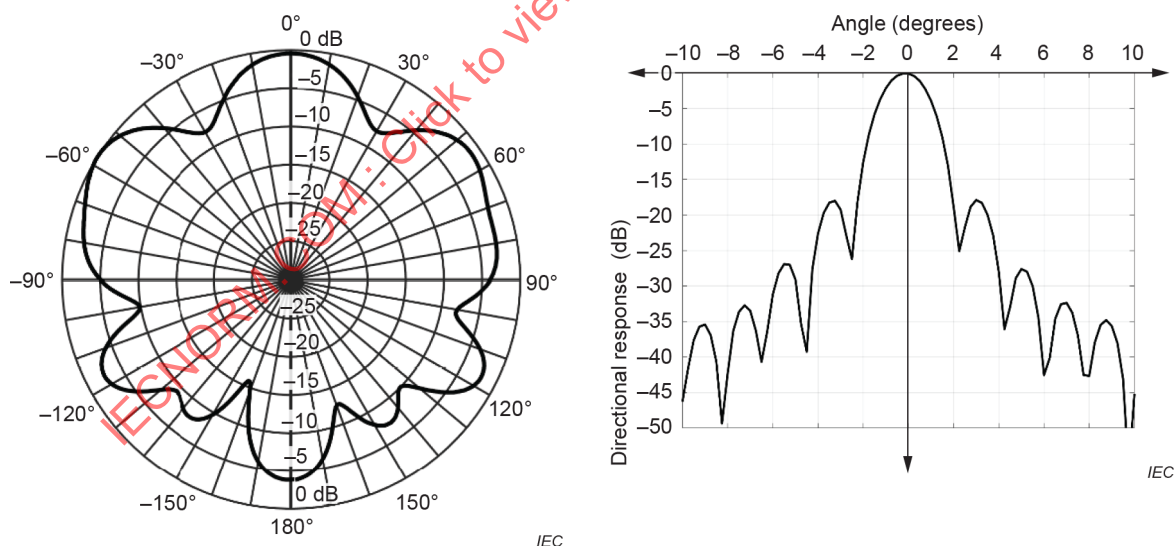


Figure A.1 – Examples of graphical representations of the level of the directional response: polar plot (left) and Cartesian plot (right)

For both plots, the amplitude scale is most often in terms of the normalized **directional response** expressed as a level in decibels (**angular deviation loss**). However, occasionally the normalized **directional response** is scaled by the sensitivity on axis to produce a response in terms of absolute sensitivity.

The reporting requirements of 10.4 apply. In addition, each **directional response** plot is identified to indicate the type of response, frequency or frequency band, and orientation within the specified co-ordinate system of IEC 60500:2017.

NOTE The angular scale for a pattern in the XY-plane is expressed as the azimuth angle, φ . The pattern in the YZ-plane, expressed as θ , indicates the direction of the positive Y-axis, and, similarly for the pattern in the XZ-plane, the direction of the positive X-axis is shown, unless the pattern in the XY-plane is omnidirectional, thus a circle.

A.11 Directivity factor

The **directivity** factor R_θ can be expressed as:

$$R_\theta = \frac{4\pi d^2 p_a^2}{\int p^2(\theta, \varphi) dS} = 4\pi \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{p(\theta, \varphi)}{p_a} \right]^2 \sin\theta d\theta d\varphi \right\}^{-1} \quad (\text{A.2})$$

where

$p(\theta, \varphi)$ is the sound pressure as a function of the direction at some fixed distance d ;

p_a is the sound pressure in the reference direction for R_θ at the same distance d ;

d is the radius of the sphere whose centre is the reference centre of the **hydrophone** (see 3.25);

dS is the differential element of area on the surface of the sphere.

Formula (A.2) refers to the emission of sound by the **transducer**. For sound reception, $p(\theta, \varphi)$ and p_a are replaced by the open-circuit voltage of the **hydrophone** as a function of the direction of the incoming sound wave.

NOTE 1 Adapted from IEC 60050-801:1994, 801-25-67.

NOTE 2 If the polar plots indicate that the **hydrophone** closely represents either a piston in an infinite baffle, or a line, then theoretical values of the **directivity** factor can be used [52], [53].

A.12 Directivity index

The **directivity** index D_i is equal to:

$$D_i = 10 \log_{10} R_\theta \text{ dB} \quad (\text{A.3})$$

NOTE See IEC 60050-801:1994, 801-25-68. For formulae, charts and graphs of D_i for some types of **hydrophones**, see [4], [52] and [53].

Annex B (informative)

Measurement of electrical impedance of hydrophones and projectors

B.1 General principles

The electrical impedance of an **electroacoustic transducer** with a piezoelectric element is dependent on several components [3], [4], [6]:

- a purely electrical impedance (often referred to as the blocked impedance), which is representative of the purely electrical characteristics and represents the impedance when the radiating surface of the **transducer** is not moving. It comprises a capacitance (blocked capacitance), but can also consist of a leakage resistance, resulting from dielectric losses.
- a motional impedance comprising:
 - a mechanical impedance resulting from the vibrational motion of the radiating surface of the **projector**. The mass, stiffness and damping of the active element behave as an electrical impedance as a result of the coupling due to the piezoelectric effect.
 - an acoustic radiation impedance resulting from the influence of the surrounding medium on the **transducer**.

The electrical impedance will vary with frequency and will be dependent on the acoustic load on the radiating surface of the **projector**. The electrical impedance will for example differ depending on whether the **projector** is radiating in water or in air. The value of the electrical impedance of a **projector** radiating in water depends on the boundary conditions: acoustic waves reflected by the walls of the tank are likely to modify the electrical impedance

A knowledge of the electrical impedance of a **transducer** enables the user to:

- gain knowledge of the **transducer** operating characteristics (for example, resonance frequency and quality factor);
- match the impedance of a **projector** to a power amplifier using an electrical matching network (for maximum power transfer);
- calculate the electroacoustic efficiency of the **projector**;
- diagnose defects in the way the **projector** operates (often a **transducer** malfunction manifests itself in the electrical impedance characteristics);
- correct for any electrical loading by amplifiers or extension cables.

B.2 Measurement of electrical impedance

The electrical impedance of a device can be measured by applying a sinusoidal electrical **signal** at the frequency of interest to the terminals of the **transducer**, and measuring the electrical voltage across the terminals and the electrical current flowing through the **transducer**. The ratio of the moduli of the voltage and current is equal to the modulus of the impedance, and the phase difference between them is the phase angle of the impedance.

In equation form, the complex impedance $\underline{Z}$ is given by:

$$\underline{Z} = Z_0 \exp^{j\theta_Z} = \frac{V_0 \exp^{j\theta_V}}{I_0 \exp^{j\theta_I}} = \frac{V_0}{I_0} \exp^{j(\theta_V - \theta_I)} \quad (\text{B.1})$$

The modulus and phase of the impedance are given by:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (\text{B.2})$$

and

$$\theta_Z = \theta_V - \theta_I \quad (\text{B.3})$$

The **transducer** impedance can be determined by measuring the applied voltage using a digitizing oscilloscope or digitizer and using the same instrument to measure the voltage corresponding to the electrical current (the current being measured using a current transformer or a small resistor in series with the **transducer**). However, the electrical impedance can also be conveniently measured using an automated impedance analyser. The instrument steps through the frequency range of interest and measures the electrical impedance by applying a low voltage continuous wave **signal** to the device under test. The operational conditions of the **transducer** (balanced or unbalanced) should be stated with the results (IEC 60500:2017).

When measuring the impedance, the **transducer** should be immersed in water and under acoustic free-field conditions (see 5.2). This means that the effect of boundary reflections should be negligible during measurements. The use of continuous **signals** in small test tanks can result in reflected **signals** being present at the **transducer** which modify the electrical impedance through the radiation impedance component of the electrical impedance. This will only be significant at frequencies close to resonance, and will be manifest as small perturbations and oscillations on the impedance values as the frequency is varied. If this is a significant problem, tone-burst **signals** should be used and the techniques of time-gating used to realize free-field conditions (see 5.2 and Annex E).

B.3 Derivation of other electrical impedance parameters

The real and imaginary components of the impedance are sometimes referred to as the resistance R and reactance X . These are related by [3], [4], [6]:

$$R = Z_0 \cos \theta_Z \quad (\text{B.4})$$

and

$$X = Z_0 \sin \theta_Z \quad (\text{B.5})$$

Similarly, the electrical admittance, Y , and electrical impedance are related by:

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (\text{B.6})$$

The conductance, G , and susceptance, B , can be obtained as follows:

$$G = Y_0 \cos \theta_Y \quad (\text{B.7})$$

and

$$B = Y_0 \sin \theta_Y \quad (\text{B.8})$$

The conductance, susceptance, resistance and reactance are related by:

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} \quad (\text{B.9})$$

and

$$X = \frac{-B}{G^2 + B^2} \quad (\text{B.10})$$

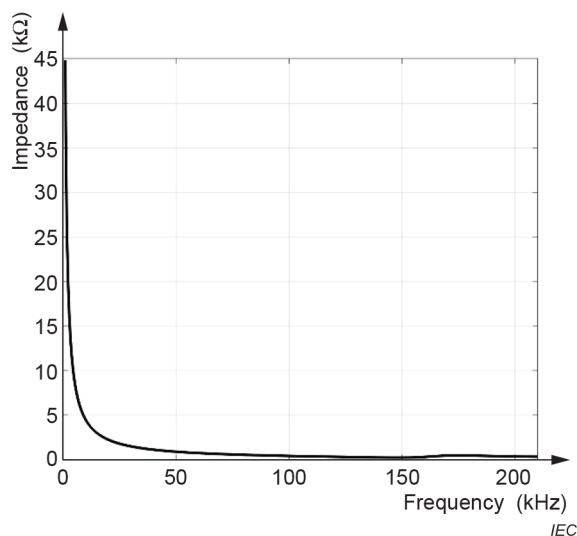
B.4 Graphical representation

The impedance and admittance can be plotted graphically against frequency to observe the trends with frequency [3], [4], [6]. In the region of the **transducer** resonance, the conductance is seen to rise to a maximum, with an inflexion appearing in the susceptance curve.

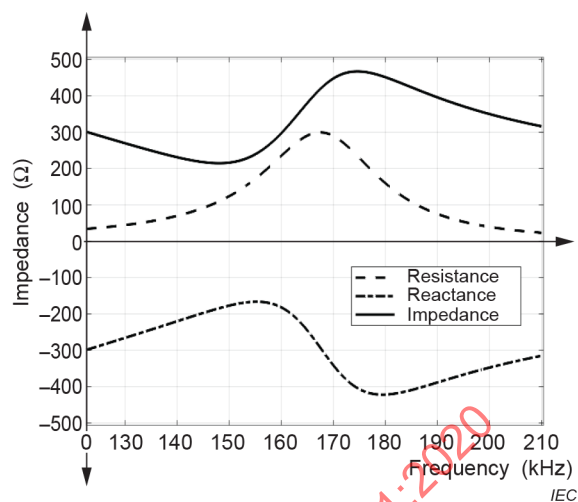
It is also common for the real and imaginary components of the impedance or admittance to be plotted parametrically by plotting them against each other as the frequency varies. As the frequency approaches the resonance frequency, the curve traces out a loop, and such a plot is sometimes referred to as an admittance loop. Examples of plots of transducer electrical impedance for a small spherical hydrophone of capacitance 3 nF are provided in Figure B.1.

The transducer quality factor (Q) is typically measured from electrical impedance data, being the reciprocal of fractional bandwidth at resonance. If the bandwidth at resonance, Δf , is calculated as the difference of the two frequency values where the electrical conductance is half the conductance value at resonance, and if f_R is the resonance frequency, Q can be calculated from:

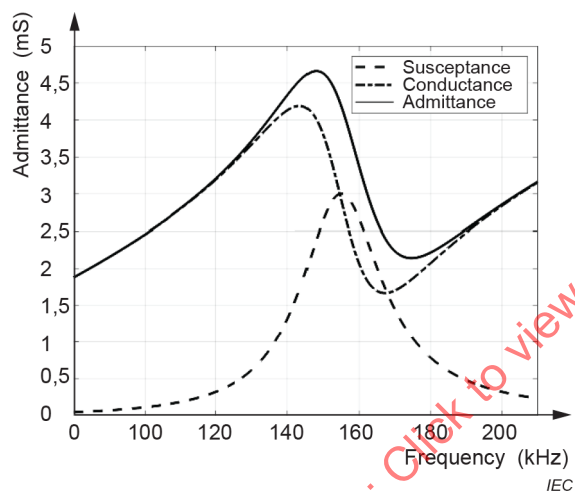
$$Q = \frac{f_R}{\Delta f} \quad (\text{B.11})$$



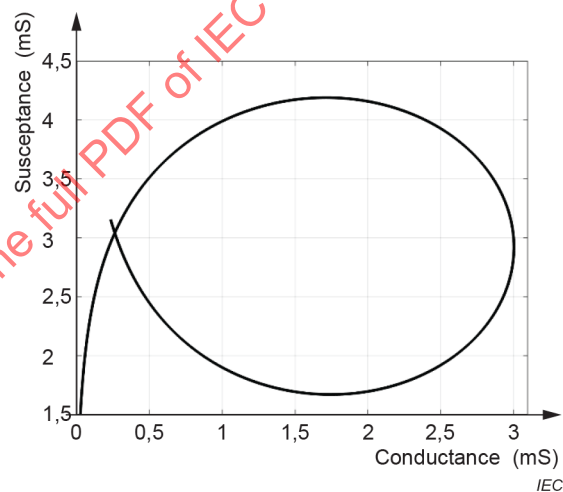
a) Electrical impedance modulus



b) Impedance modulus and resistance and reactance close to resonance frequency of 240 kHz



c) Admittance modulus conductance and susceptance close to resonance frequency



d) Admittance loop plot

Figure B.1 – Examples of plots of transducer electrical impedance for a small spherical hydrophone of capacitance 3 nF

Annex C (informative)

Calculation of electrical loading corrections

C.1 Electrical loading corrections

The sensitivity of a **hydrophone** is often specified as the end-of-cable open-circuit sensitivity. This is the sensitivity of the **hydrophone** at the end of its cable when not connected to an electrical load. When a specific electrical load, such as an oscilloscope, an amplifier, or extra cable is used at the output of the **hydrophone**, the loaded sensitivity of the **hydrophone** can be related to the open-circuit sensitivity.

C.2 Corrections for amplifier loading using complex electrical impedance

Consider the general case in which the **hydrophone** is considered as a two-terminal network of complex electrical impedance, $\underline{Z}_H$, connected to an electrical load of complex electrical impedance, $\underline{Z}_L$. The end-of-cable loaded sensitivity of the **hydrophone**, $\underline{M}_L$, when connected to the specified load is related to the end-of-cable open-circuit sensitivity, $\underline{M}_0$, by [2]:

$$|\underline{M}_L| = |\underline{M}_0| \sqrt{\frac{Re(\underline{Z}_L)^2 + Im(\underline{Z}_L)^2}{[Re(\underline{Z}_L) + Re(\underline{Z}_H)]^2 + [Im(\underline{Z}_L) + Im(\underline{Z}_H)]^2}} \quad (C.1)$$

where $Re(\)$ and $Im(\)$ denote the real and imaginary parts of the relevant complex electrical impedance.

Often, the electrical load can be assumed to be a parallel combination of a resistance R_L and capacitance C_L . In this case, $Re(\)$ and $Im(\)$ are given by:

$$Re(\underline{Z}_L) = \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (C.2)$$

and

$$Im(\underline{Z}_L) = \frac{-\omega C_L R_L^2}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (C.3)$$

where ω is the angular frequency.

C.3 Corrections for loading caused by extension cables (using complex electrical impedance)

For **hydrophones** without an integral preamplifier, measurements of complex impedance and sensitivity made at the end of an added extension cable can be corrected using Formulae (C.4) and (C.5). These formulae require only measurements of the complex impedance of the **hydrophone** with extension cable, and of the extension cable alone in order to determine the complex impedance and open-circuit sensitivity of the **hydrophone** at the end of the integral **hydrophone** cable [3], [23].

When operating at low RF frequencies (hundreds of kilohertz or greater), any added extension cable can be considered as a two-port electrical network [16]. To fully describe the electrical behaviour in this way requires the use of both the open-circuit impedance and the short-circuit impedance. In this case, the complex impedance of the **hydrophone** $\underline{Z}_H$ is given by:

$$\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{oc} (\underline{Z}'_H - \underline{Z}_{sc})}{\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}'_H} \quad (\text{C.4})$$

where $\underline{Z}'_H$ is the complex impedance of the **hydrophone** and extension cable, $\underline{Z}_{oc}$ is the complex impedance of the extension cable alone measured with the free end open-circuit, $\underline{Z}_{sc}$ is the complex impedance of the extension cable alone measured with the free ends short-circuited.

The open-circuit sensitivity of the **hydrophone** at the end of the integral **hydrophone** cable, $\underline{M}_0$, can be derived from the open-circuit sensitivity measured at the end of the extension cable, $\underline{M}_c$, as follows [23]:

$$|\underline{M}_0| = \frac{\sqrt{|\underline{Z}_{oc} (\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}_{sc})|}}{|\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}'_H|} |\underline{M}_c| \quad (\text{C.5})$$

By use of Formula (C.4), it is possible to derive the complex electrical impedance of the **hydrophone** from impedance measurements of the **hydrophone** with added extension cable and the extension cable alone, in both open- and short-circuit configurations. Similarly, from these same impedance measurements, and a measurement of the open-circuit sensitivity of the **hydrophone** with added extension cable, Formula (C.5) enables the derivation of the open-circuit sensitivity of the **hydrophone** alone (at the end of its integral cable).

Unlike **hydrophones** tested with additional cable lengths added, correction factors are not typically computed or used for transmit responses of **transducers** obtained with extension cables.

C.4 Corrections using only capacitances

A further simplification is possible if the electrical impedances of both the **hydrophone** and the load can be assumed to be capacitive. This is a valid assumption for a **hydrophone** only at frequencies much less than the resonance frequency and for loads such as extension cables at low frequencies. In this case, if C_H is the end-of-cable capacitance of the **hydrophone** including any integral cable and connector, and C_L is again the load capacitance, the correction reduces to [2], [23]:

$$\underline{M}_L = \underline{M}_0 \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (\text{C.6})$$

Annex D (informative)

Acoustic far-field criteria in underwater acoustic calibration

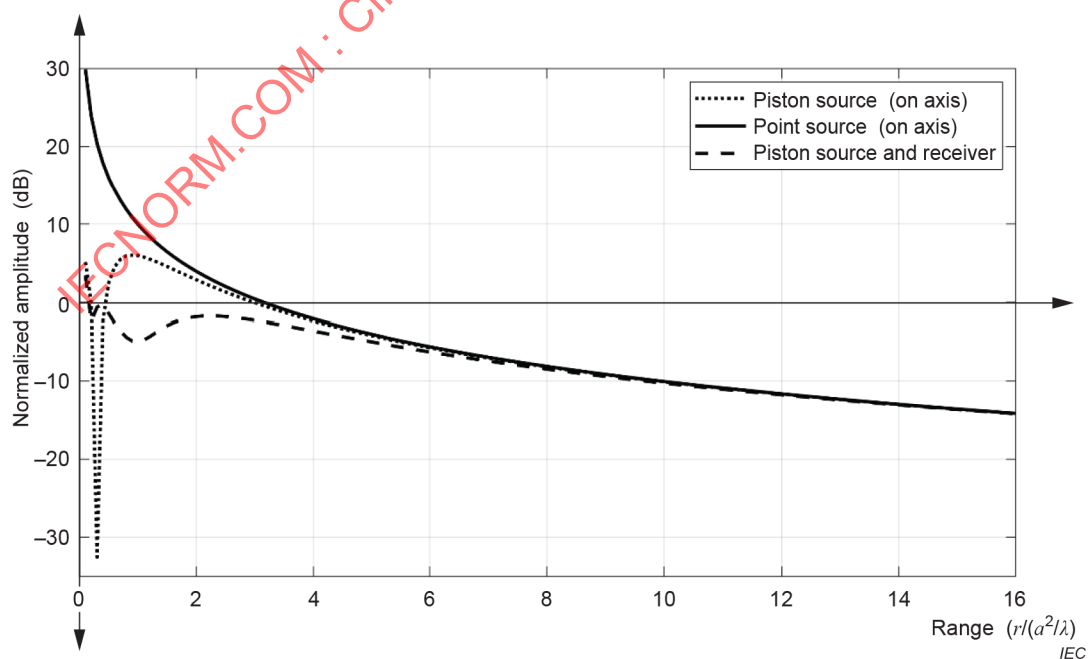
D.1 General

Acoustic calibrations are undertaken in the **acoustic far-field** of the **transducers** under test, where the acoustic field approximates to spherical spreading. The source–receiver distance required to approximate to a spherically-spreading field depends on the **transducer** size and the acoustic wavelength. Although in some cases one **transducer** will be much smaller in size and approximate to a point receiver or source, in the general case both **transducers** will be of finite size and the **acoustic far-field** criterion is applied to both the source **transducer** (**projector**) and the receive **transducer** (**hydrophone**) [7] to [9].

D.2 The field for piston transducers

To illustrate the calculation of the far-field criteria, consider the acoustic field generated by a common type of **transducer**: a (circular) piston-type **transducer**. The acoustic pressure generated by piston **transducer** with a uniform velocity on its transmitting surface is a complicated function of distance from the source, r , and angle with respect the **transducer** principal axis. The distance required for the acoustic field to approximate to spherical spreading to within a specified tolerance depends on the acoustic wavelength, λ , and the **transducer** size, which can be specified in terms of the radius, a .

Figure D.1 shows the results of a numerical simulation using the Rayleigh integral [54], carried out to compare the acoustic pressure generated by the piston receiver on the principal axis as a function of range (source–receiver distance), with $ka=10$, where k is **wavenumber**. The range is scaled by a factor of a^2/λ and the vertical scale is normalized in arbitrary units. The acoustic pressure along the axis of the **transducer** is plotted; this is the acoustic pressure that would be measured by an ideal point receiver.



NOTE Also shown is the acoustic pressure measured by a co-axially positioned piston receiver of same dimensions.

Figure D.1 – Acoustic pressure as a function of range from the source for a point source and for a piston source of dimensions $ka = 10$

Also plotted is the acoustic pressure averaged over the face of a piston receiver of the same physical dimensions as the source (a "worst-case" scenario), with the acoustic pressure again determined using the Rayleigh integral by a summation of the acoustic pressures over the face [54]. Also plotted in Figure D.1 is the spherically-spreading field due to a point source positioned at the acoustic centre of the source **transducer** (centre of the piston face). Both the point and piston receiver plots converge asymptotically to the spherically-spreading far-field response as the range increases.

Figure D.2 shows the difference between the **acoustic far-field** pressure in a spherically-spreading field and the acoustic pressure measured by point receiver and the piston receiver. The difference is about 0,27 dB for the point receiver at the distance $r = D^2/\lambda = 4a^2/\lambda$, where $D = 2a$ and is the diameter of the **transducer**. The far-field distance for the same difference for the piston receiver is $r \approx 9a^2/\lambda$.

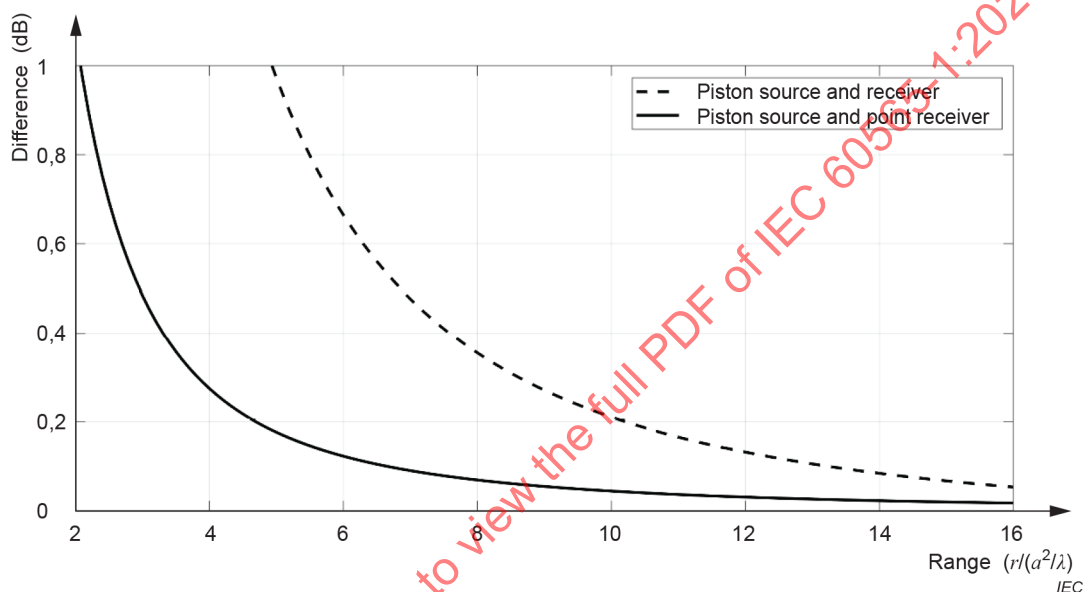


Figure D.2 – Difference in measured acoustic pressure on axis compared to spherical spreading measured by a point receiver and a piston receiver

D.3 Criteria for far-field conditions

For the **transducers** to be positioned at a separation distance for a sufficient approximation to spherical spreading, the distance, r , should be chosen so that:

$$r > K_f \left(\frac{D_1^2}{\lambda} + \frac{D_2^2}{\lambda} \right) \quad (\text{D.1})$$

where K_f is a factor chosen to ensure that the acoustic field approximates to spherical spreading to within a specified tolerance and D_1 and D_2 are the diameter of the **transducers**. From the plot shown in Figure D.2, the difference can be reduced to less than 0,2 dB by applying the far-field distance calculated in Formula (D.1) and choosing a factor of $K_f = 1,3$ for both types of receiver.

NOTE Calculation of the curves shown in Figure D.2 for different **transducer** ka values shows that the corrections are relatively independent of the choice of ka value.

D.4 Far-field criteria in directional response measurements

When measuring the **directional response** of a **transducer**, the distance between the **projector** and the **hydrophone** shall be larger than that given by Formula (D.1) and simultaneously:

$$r > 5D_1 \text{ and } r > 5D_2 \quad (\text{D.2})$$

The distance shall be no less than twice that given by Formula (D.1) or Formula (D.2), whichever is larger. See references [4], [7] to [9].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

Annex E (informative)

Pulsed techniques in free-field calibrations

E.1 General

To achieve a free-field environment for the calibration of underwater **electroacoustic transducers**, the measurements should be made in the absence of acoustic reflections from the boundaries of the medium. This can be achieved by use of a facility based on a large volume of water such as a lake or reservoir, or during trials at sea. In such cases, the reflections are often sufficiently attenuated by propagation losses and by absorption at the boundaries that continuous wave **signals** can be employed. However, such facilities have disadvantages such as lack of environmental control, logistical difficulties in deployment, and relatively high financial cost [4].

The disadvantages of using large volumes of water have led to the use of laboratory tanks for calibration. Such facilities provide controlled environments for test and calibration of **transducers** and enable suitable rigging and mounting for the **transducers** to be incorporated into the facility at more affordable cost. However, to use finite-sized tanks, a means should be found to eliminate the effect of boundary echoes (or at least to control or limit their influence). One method is to coat the boundaries with absorbers. However, effective absorbers for underwater sound are expensive and rarely provide sufficient broadband absorption at low kilohertz frequencies. Nevertheless, absorbers are useful in reducing the overall reverberation time of the tank, allowing faster **signal** repetition rates.

The most common method of achieving a free-field environment for calibration is to use electronic gating techniques to gate the transmitted and received **signals**. The direct path **signal** can then be isolated in the time-domain before the arrival of boundary reflections (which undergo a longer propagation path and arrive later in time). A suitable time interval is necessary between the transmissions of successive pulses to allow any reverberation to die away.

Typically, bursts of single frequency sound are used as the **signal** type. The **signal** can be generated using a sinusoidal oscillator and an electronic gating unit, or using a function generator that will generate a "tone-burst" **signal** directly. This **signal** is then swept through discrete frequencies to provide each of the required frequencies for measurement [3], [4], [6], [10], [47] to [51].

Other broadband **signal** types, such as broadband pulses and swept **signals**, can be used to provide greater frequency coverage within each pulse. However, these can result in a degraded **signal**-to-noise ratio at the frequencies of measurement.

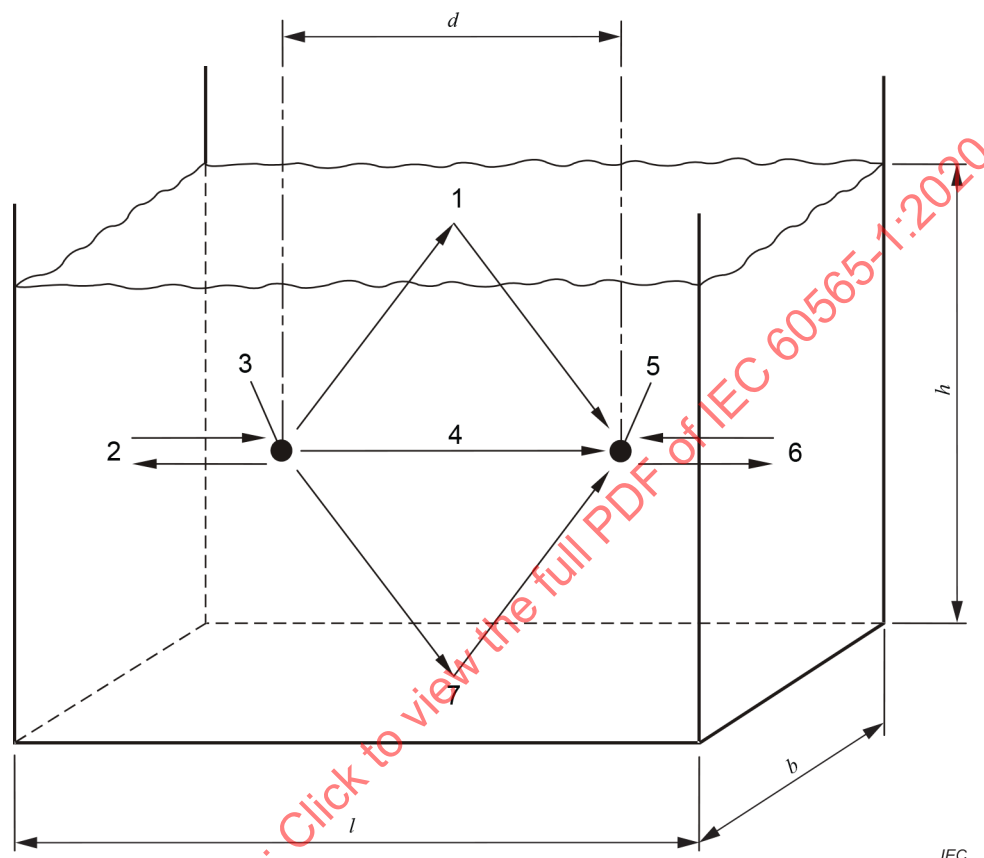
E.2 Echo-free time

Figure E.1 shows a schematic view of two **transducers** in a rectangular cross-sectioned laboratory tank illustrating the sources of echoes from the boundaries. By simple geometrical considerations (and with an estimate of the speed of sound in water), it is possible to calculate the arrival time of the echoes and therefore the amount of time-domain **signal** available for analysis before the arrival of echoes: the "echo-free time".

Note that in the example, the **transducers** are optimally positioned on a central axis of the tank to give the greatest time delay between the direct path arrival and the arrival of the boundary echoes. However, the amount of echo-free time will depend upon the separation distance chosen.

Ignoring multiple reflections, if the arrival time of the N th boundary echo relative to the direct path arrival is denoted by T_N and the speed of sound is c then the following relationships should be satisfied:

$$T_1 = \frac{l-d}{c} ; T_2 = \frac{2d}{c} ; T_3 = \frac{\sqrt{b^2 + d^2} - d}{c} ; T_4 = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \quad (\text{E.1})$$



Key

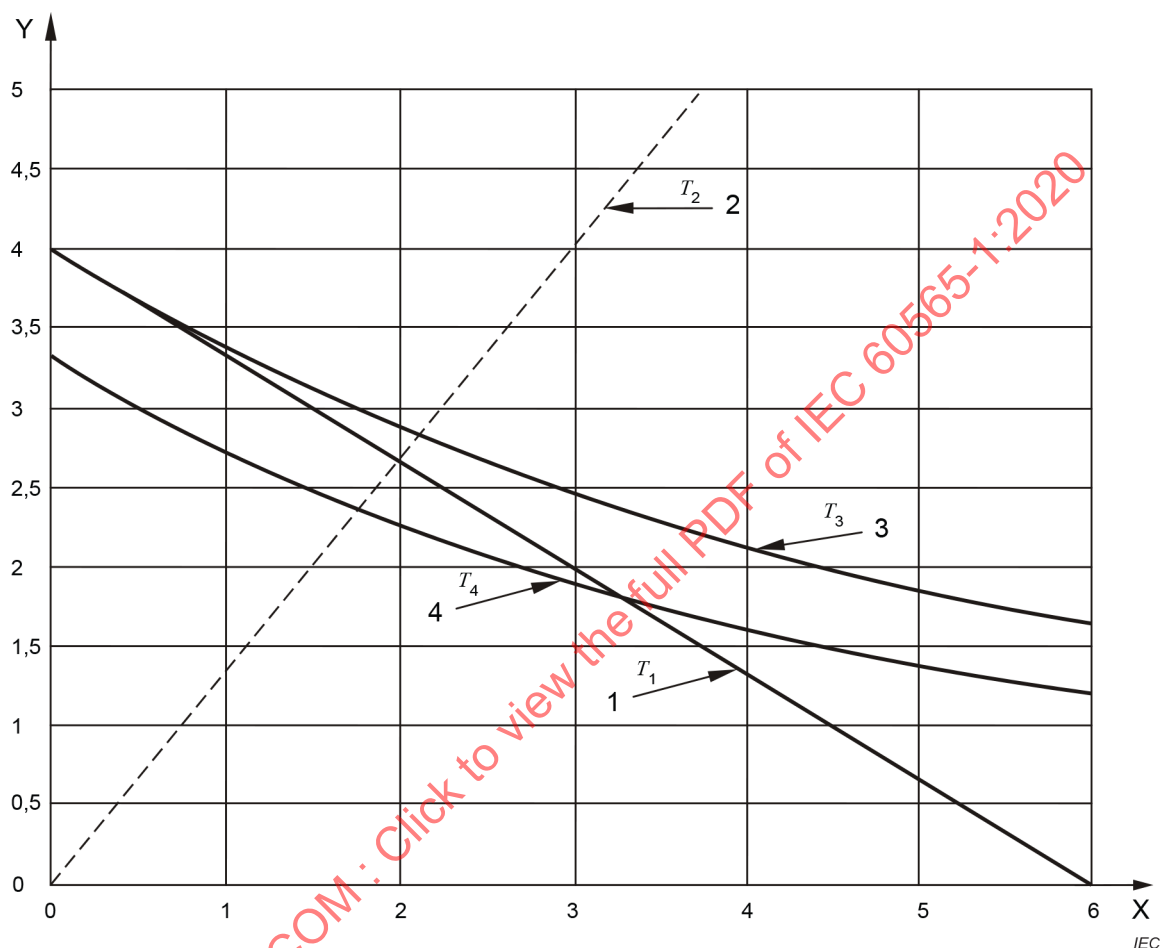
- 1 Surface reflection
- 2 Back wall reflection
- 3 Transmitter
- 4 Direct signal
- 5 Receiver
- 6 Far wall reflection
- 7 Bottom reflection

Figure E.1 – Schematic diagram of a projector and receiver in a water tank showing the main sources of reflections

The first relationship concerns reflections from the end walls of the tank, the second relates to reflections between **transducers**, the third relates to reflections from the side walls of the tank, and finally the fourth relates to the reflections from the bottom and water surface. These formulae have been plotted in Figure E.2 for the example of a tank that is 6 m long by 6 m wide by 5 m deep. For the measurements to be made in the absence of boundary reflections at a chosen separation distance, the duration of the transmitted pulse cannot exceed the values given by the lowest-valued curve shown on Figure E.2. For example, at a separation of 2 m, the echo-free time in this tank is approximately 2,25 ms.

E.3 Minimum separation distance

An additional factor which should be taken into account is the minimum separation distance required to achieve acceptable far-field conditions. This is described in detail in Annex D. For measurement of **directional responses**, the minimum separation distance requirements are more stringent and a distance of at least twice the above minimum is recommended, see Annex A.



Key

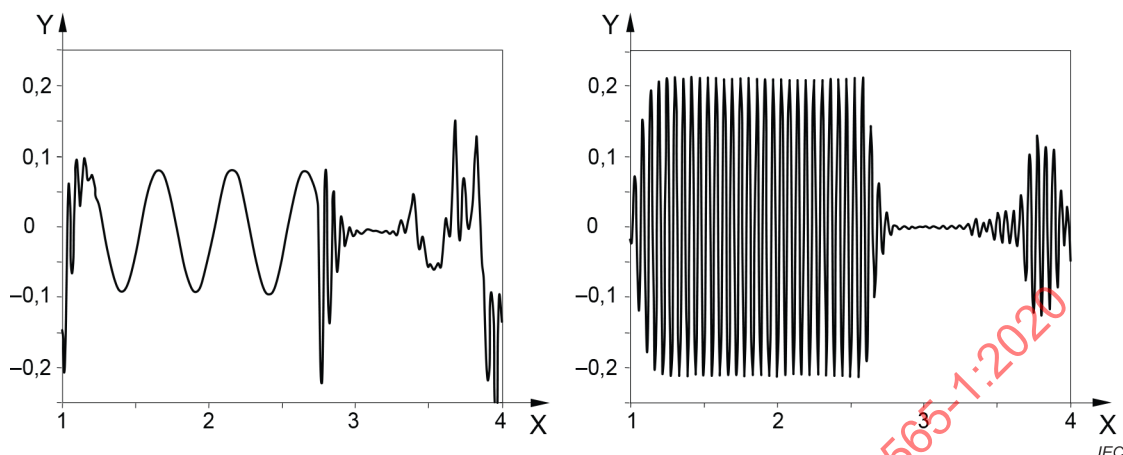
- 1 End wall reflections
- 2 Reflections between transducers
- 3 Side wall reflection
- 4 Surface and bottom reflections
- X Separation in metres
- Y Echo arrival time in milliseconds

Figure E.2 – Echo arrival time in a 6 m × 6 m × 5 m tank with optimally placed transducers

E.4 Turn-on transients

In addition to reflections of the transmitted **signal** from the tank walls and floor, and the water surface, the **hydrophone signal** is also contaminated by transients due to the resonant behaviour of the devices. From the sampled **signal**, an estimate of the steady-state amplitude of the **hydrophone signal** is required. Figure E.3 shows typical examples of **hydrophone signals** measured during a calibration showing the turn-on transients, steady-state region and the arrival of the first reflections. At low frequencies, there are fewer complete cycles of the

transmitted **signal** within the steady-state region. Consequently, direct measurement of the steady-state portion of the received **signal** is less reliable, and ultimately this imposes a lower bound on the range of frequencies over which **hydrophones** can be calibrated.



Key

X Time (milliseconds)
Y Voltage (volts)

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))

If the echo-free time for a particular tank with **transducers** optimally positioned is denoted by T then the number of cycles available for analysis before the arrival of reflections is equal to the product fT , where f is the frequency of excitation.

If these cycles are to be used for analysis by conventional methods, steady-state conditions should be reached. The **electroacoustic transducers** used in underwater acoustics are typically resonant devices of quality-factor, Q . For such devices, it takes Q cycles of the resonance frequency for the **signal** to reach approximately 96 % of its final steady-state value. Therefore, it will take approximately Q cycles of the resonance frequency before the initial turn-on transients have almost completely died away, even when the **projector** is driven off-resonance. For situations where $Q > fT$, so that steady-state is not reached within the free-time available, it is not possible to make a direct measurement of the steady-state **signal**.

Note that the transient behaviour observed in the **signal** will also depend on the Q-factors of other items in the measuring system. If the receiving **hydrophone** has a resonance close to the frequency of measurement, this will influence the waveform shape. Similarly, if any measuring instrument (amplifier, filter, etc.) displays any resonant behaviour in the frequency range, this will also influence the transient behaviour.

By the above arguments, it can be seen that for any given size of tank, there will be a frequency (depending on the **transducer** Q-factor) where the accurate use of conventional measurement techniques becomes impossible [3], [4], [6].

E.5 Bandwidth considerations

The chief disadvantage of the pulsing technique is that a pulse consists of a spectrum of frequencies whereas a continuous sinusoidal **signal** contains only one frequency. Undistorted transmission of a pulse through the transmitting amplifier, sound **projector**, **hydrophone** and receiving system requires a broad band and constant overall system response above and below the measuring **signal** frequency. Some variation from the ideal conditions will always exist [4].

The transmitted pulse is generally a rectangular pulse modulating the carrier frequency, which is the measurement frequency. For measurement purposes, the bandwidth of the overall system should be two to twenty times the reciprocal of the pulse duration. A bandwidth that is approximately twice the reciprocal of the pulse duration will yield a maximum **signal**-to-noise ratio. The amplitude of the pulse envelope will be 2 dB above the amplitude of a square pulse transmitted by the bandwidth of twenty times the reciprocal of the pulse duration. A bandwidth that is twice the reciprocal of the pulse duration is sometimes referred to as the essential bandwidth. The application of **signal** averaging over repeated tone bursts can improve the **signal**-to-noise ratio considerably.

E.6 Electrical cross-talk

When pulsed **signals** are used, the electrical cross-talk can be easily identified (and eliminated) by time-windowing since it will arrive at the receiver essentially instantaneously without the time delay observed for propagation of the acoustic **signal**. In order to avoid interference when electrical cross-talk is present, the pulse duration should not be greater than the acoustic propagation delay, so that the two **signals** cannot overlap in time.

E.7 Pulse duration

Based on the considerations discussed above, the pulse duration τ should satisfy the following conditions:

- a) $\tau \leq T_N$ so that the direct **signal** is separated from the reflected **signals**.
- b) $\tau \geq Q/f$ so that steady-state is reached.
- c) $\tau \leq d/c$ so that the direct **signal** is separated from the electrical cross-talk.
- d) $\tau \geq 2/W$ so that the direct **signal** is undistorted. Here, W is the bandwidth of the overall measurement system including the **transducers**.

E.8 Reverberation and pulse repetition rate

With pulsed **signals**, it is necessary to choose a pulse repetition rate which is low enough for all reverberation in the tank to die away before transmission of the next pulse [4]. To check for reverberation, the receive **signal** on an oscilloscope should be observed and it should be checked that there is no **signal** present at the frequency of measurement during the time immediately before the pulse is transmitted.

The pulse repetition rates used in underwater acoustic calibrations in test tanks are generally in the range of a few hertz to perhaps 100 Hz with pulse durations varying from less than 0,1 ms to 10 ms depending on **signal** frequency and available echo-free time. A lower value of pulse repetition rate is required at low **signal** frequencies if reverberation is to be avoided.

E.9 Typical tank dimensions

In Clauses E.1 to E.8, it can be seen that the smaller the tank, the higher will be the lower limiting frequency. Smaller tanks of minimum dimension about 1 m to 2 m are often used for calibration at high frequencies (hundreds of kilohertz) [3], [4], [6]. However, in order to reach low kilohertz frequencies, tank dimensions of between 3 m and 15 m are typically used. The lowest limiting frequency for such tanks will depend on the Q-factors of the **transducers** under test which govern the time for steady-state **signals** to be reached (see Clause E.4), and the ka value of the **transducers** which govern the distance required to achieve far-field conditions (see Clause E.3). For the calibration of small low- Q **transducers**, the lower limiting frequency of

such tanks is of the order of 1 kHz, but this can be extended lower if the steady-state **signal** can be estimated from very few cycles of the direct **signal**. In some facilities, absorbers are used on one or more internal surfaces to reduce reverberation time. In general, the smallest dimension of the tank is often the depth.

E.10 Spherical-wave conditions

The existence of a spherically-spreading wave in the **acoustic far-field** can be verified by comparison of the **electrical transfer impedance** magnitudes when the distance between **projector** and **hydrophone** is varied. For a spherically-spreading field, the product of the **electrical transfer impedance** magnitude and separation distance should be invariant (taking account of sound absorption by water for high kilohertz frequencies). Alternatively, for a constant drive voltage to the **projector**, the received voltage of the **hydrophone** will vary inversely with distance and the product of voltage and distance is invariant [40]. The degree to which this product varies with distance is an indication of the uncertainty that can be ascribed to this factor. In ideal conditions, it should be possible to obtain variation of less than $\pm 2\%$. Variation of greater than $\pm 5\%$ can indicate additional problems (e.g. from boundary reflections) and should be investigated further.

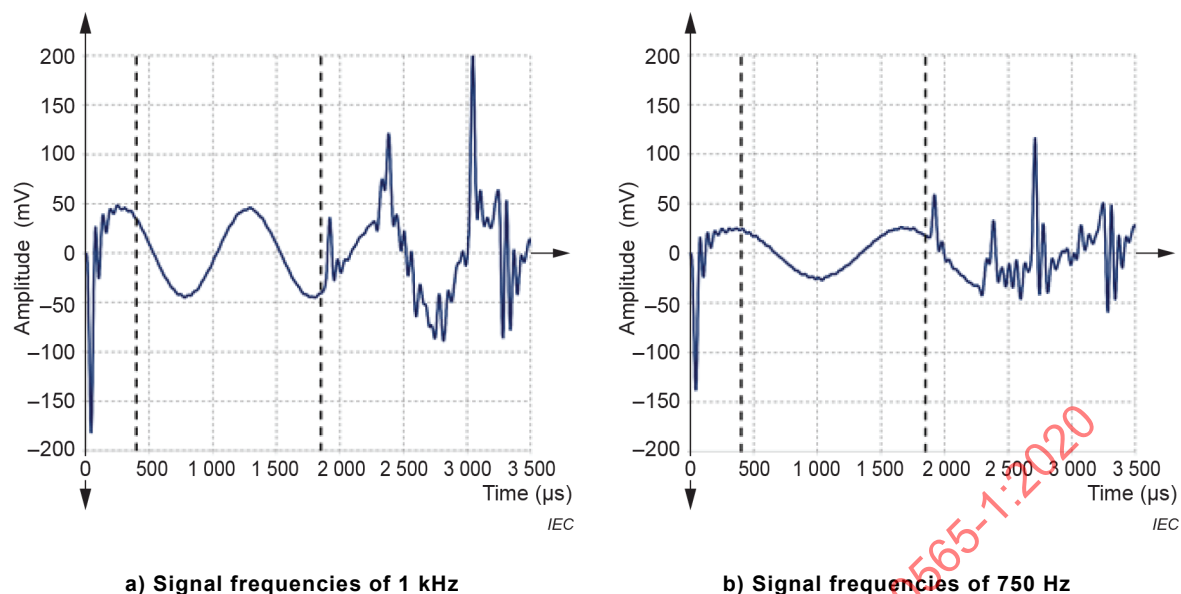
E.11 Reflections from mounting poles and rigging

The presence of reflected **signals** from mounting poles, even of low amplitude, can cause variations to the measured sensitivity. These will manifest themselves as ripples and perturbations on the measured frequency response. Because the path-length differences between the reflected and direct **signals** will change as the source is moved away from the receiver, the perturbations will appear to vary with the projector-**hydrophone** separation distance. This means that the measured sensitivity can show a modest dependence on the projector-**hydrophone** separation distance used in the calibration [55], [56]. This effect can also be apparent for **hydrophones** with large preamplifier bodies which generate reflected **signals** that are received by the **hydrophone** element.

In general, the mounting poles used for **hydrophones** should be rigid enough to enable accurate positioning and alignment, constructed of strong materials that do not corrode, and that do not cause substantial acoustic reflections. For the latter requirement, the use of free-flooding tubes in the rigging is recommended. It is recommended that air-filled structures are avoided.

E.12 Analysis methods for tone-burst signals

In the case where there is enough echo free-time before the arrival of the first echoes for the steady-state **signal** to be observed directly, a number of different methods can be employed to make an estimate of the steady-state **signal** amplitude. Typically, a time-window or gate is applied to the digitized waveform so that only a selected region of the steady-state **signal** is made available for analysis. Figure E.4 illustrates the principle.



SOURCE: [58]. Reproduced with permission.

Figure E.4 – Examples of acoustic waveforms showing time-windows for analysis

Methods of measuring the amplitude of the steady-state component are as follows.

- Direct measurement of the peak voltage by measuring the maximum and minimum of the digitized **signal** (or by a peak detector).
- Calculating the RMS voltage (by squaring, averaging and square rooting the digitized **signal**). This is done using an integer number of cycles of the sinusoidal **signal**.
- Performing a fast Fourier transform (FFT) of the **signal** and taking the amplitude of the spectrum at the drive frequency, again using an integer number of cycles.
- Performing a "narrow-band" discrete Fourier transform (DFT) of the **signal**, calculating only the amplitude of the component at the drive frequency, using an integer number of half cycles.
- Performing a fit of a sine-wave of the appropriate frequency in a least-squares sense and taking the amplitude of the fitted sine-curve.

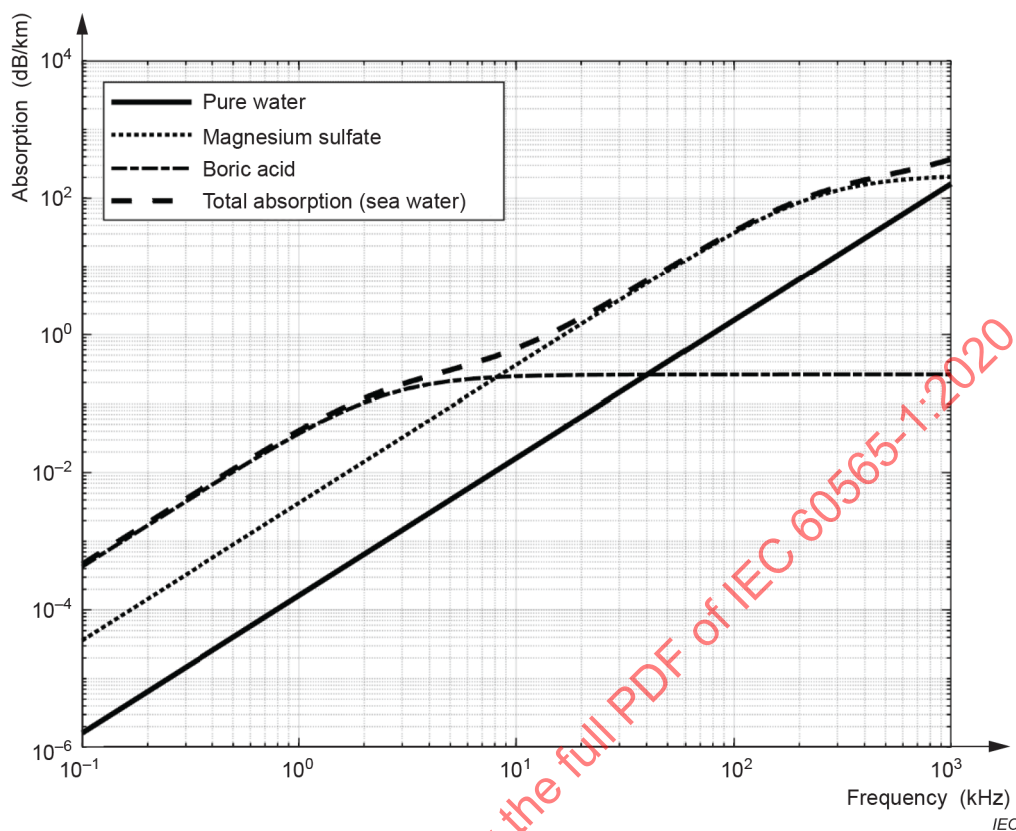
All the above methods have strengths and weaknesses. The peak measurement of a) is simple to implement but inaccurate in the presence of any noise, distortion and residual amplitude fluctuations of the waveform envelope. The other methods need a little more processing, perhaps with dedicated software algorithms. However, methods b) to e) will provide some effective averaging of small amplitude variations if many cycles are contained within the time window. Methods c) to e) will also provide some discrimination against noise and can also provide information on phase as well as amplitude. However, errors can occur with methods b) to c) if an integer number of cycles is not used for the analysis. Also, with the FFT of method c), an error can be introduced if the spectrum does not contain a point at the exact frequency of excitation (so-called "picket-gate" effect). Both methods d) and e) can still provide acceptable accuracy even when analysing only a fraction of a cycle of **signal** but with increased uncertainty.

E.13 High-frequency limitations

The high-frequency limit is governed by a number of factors.

The attenuation of sound due to absorption in the water increases rapidly with frequency, reaching about 0,25 dB/m at 1 MHz for fresh water and 0,4 dB/m for sea water [17] to [22]. This will increase the propagation loss at very high frequencies such that the **signal**-to-noise ratio available for high separation distances is poor. Figure E.5 shows values for the absorption in

pure water and sea water (including contributions due to component factors). If calibrations are attempted in media other than water, then the absorption will need to be known [57].



NOTE Data taken from [20] and [22].

Figure E.5 – Values for the sound absorption in pure water and sea water, including contributions due to component factors

The minimum separation distance required permitting suitable **acoustic far-field** conditions to exist for a specific **transducer** pair increases with frequency (see Clause D.3). However, when using tone-burst **signals**, increasing the **transducer** separation distance will tend to reduce the echo-free time available for measurements before the arrival of reflected **signals** from the tank boundaries. A significant reduction in echo-free time will restrict the time window available for observation of the steady-state **signal** (see Clause E.2).

In general, a combination of the above factors will tend to determine the high-frequency limit for calibrations. At frequencies above 0,5 MHz, particularly for miniature **hydrophones** used in medical ultrasound, consideration should be given to use of the alternative methods described in IEC 62127-2. These alternative methods include relative methods based on comparison with a calibrated reference **transducer** or **hydrophone**. An alternative primary method is a so-called "two-**transducer** reciprocity method", where the transmitting current response of a source **transducer** is first determined by the self-reciprocity method using a reflective planar target under approximately plane-wave conditions (requiring the plane-wave reciprocity parameter to be used). This auxiliary **transducer** is then used to calibrate the **hydrophone** under test by a calibrated **projector** method. This method is suited to **transducers** that produce narrow beams [2]. Another primary method measures the acoustic field using an optical interferometer, outlined in Annex I.

E.14 Low-frequency limitations

The lowest frequency for calibrations is limited by several factors.

When using tone-burst **signals** in finite-sized test tanks, the number of cycles of steady-state **signal** available for measurement depends on the Q-factor of the **transducers** and the echo-free time of the test tank (which in turn depends upon tank size and **transducer** separation). As the frequency is lowered, the number of cycles in the available time-window is reduced until eventually the steady-state **signal** amplitude can no longer be determined by conventional means. This provides a lower limiting frequency on measurements made using tone-burst **signals**.

In addition, the sound pressure level produced by the transmitting **transducer** can be reduced as the frequency is lowered, eventually falling to where it is less than 6 dB above the ambient noise level thereby limiting the minimum frequency for calibrations.

For a piezoelectric **transducer** used well below the lowest resonance frequency, the sound pressure output at a constant current is proportional to the frequency. For an electrodynamic **transducer**, the sound pressure output at constant drive current decreases proportionally with the square of the frequency well below the first resonance (although the response is relatively constant between the first and second resonances).

The minimum separation distance for a given **transducer** size at low frequencies is given in Annex D.

In general, a combination of the above will tend to determine the low-frequency limit for calibrations. For most large test tank facilities of minimum dimension 5 m or greater, the practical low-frequency limit for calibration of **hydrophones** will be of the order of 500 Hz to 1 kHz depending on the Q-factor of the **transducer**. For the calibration of small low-Q **transducers**, the lower limiting frequency for tanks of dimensions of 5 m is of the order of 1 kHz, but this can be extended lower if the steady-state **signal** can be estimated from very few cycles of the direct **signal** [58], [59].

E.15 Advanced techniques for extending the frequency range beyond the low-frequency limit

The lower frequency limit for free-field calibration in reverberant tanks can be extended by use of more sophisticated **signal**-processing techniques [60]. Some of these methods attempt to extend the duration of the steady-state **signal** available for analysis while still working within the echo-free time of the test tank. An example is **signal**-modelling, in which a model of the **signal** is constructed that allows estimates of the steady-state amplitude and phase to be derived when very little (or even none) of the steady-state response is observed directly [58], [59]. The model used in this method can be extended to include the first few reflected **signals** and can be used to calibrate relatively high Q-factor projectors [58]. Another method is that of transient suppression, where the source **transducer** is driven with a waveform which is designed to suppress the transient **signal** typically produced by resonant **transducers** at the start of the transmitted burst, thus producing a longer duration for the observed steady-state **signal** (and consequently a greater number of cycles for analysis). This method has been implemented with some success, though careful matching of electrical impedance is required to maintain the fidelity of the required drive waveforms through any power amplifier used [61], [62]. Another approach is to use short broadband pulses as drive **signals** enabling the reflected **signals** to be eliminated by time-gating and a broader frequency band to be covered with each pulse. However, the resonant nature of **electroacoustic transducers** militates against the use of very broadband pulses, and though inverse filtering techniques can be used to equalize the spectral content of the **signals**, the **signal**-to-noise ratio is sometimes compromised at low kilohertz frequencies [6], [60].

Another group of methods, instead of attempting to make greater use of the echo-free **signal**, make use of all the received **signals** including reflections but attempt to eliminate the effect of the reflections using **signal** processing. Examples of such techniques include the time-delayed spectrometry method, which uses swept sinusoidal **signals** and a narrow-band swept filter synchronized to the drive **signal** but with a delay to accommodate the acoustic propagation delay. The tracking filter enables the isolation of the direct arrival **signals** from the reflections

(the reflected **signals** arriving at a later time and at frequencies outside the pass band of the tracking filter) [2], [63], [64]. Other methods have used pseudo-random noise **signals** to undertake a calibration in a diffuse-field [6], [60], [65], [66].

Finally, some calibration methods in reverberant water tanks make use of continuous broadband **signals** and determine an average of the complex frequency dependence of the reverberant-field ETI. Here, the effects of reflections are eliminated by complex averaging of the frequency dependence of the **electrical transfer impedance** of the **transducers**, deriving the value of the free-field transfer impedance averaged over the effective frequency band of the measuring tank. These methods are described further in Annex J.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

Annex F (informative)

Assessment of uncertainty in the calibration of hydrophones and projectors

F.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated uncertainty [43].

In general, uncertainty components are grouped according to how the values are estimated:

- Type A: evaluated by statistical means;
- Type B: evaluated by other means.

F.2 Type A evaluation of uncertainty

This can be obtained from a statistical analysis of the repeatability of the calibrations.

Ideally, the repeated measurements should be truly independent repeats, with the **hydrophones** removed from the water and remounted before the calibration is repeated.

Where it is not feasible to undertake independent repeats, and where historical data exist for the repeatability of the measurements with the devices in question, values for the typical repeatability for calibration of a **hydrophone** can be used.

This assessment should follow a Type B evaluation.

F.3 Type B evaluation of uncertainty

Type B components of uncertainty are those that are not assessed by statistical means, in other words those components that remain constant when the measurement is repeated. For example, any systematic bias in a measurement should be regarded as a Type B contribution. Similarly, the uncertainty in the calibration of a calibrated instrument provides a Type B contribution.

The sources of these components should be identified by assessing all of the influences which can introduce uncertainty into the measurement. These will be different for each measurement system and should be assessed individually. The value of each component should be estimated along with an associated probability distribution.

F.4 Reported uncertainty

The combined uncertainty should be obtained from the individual components [43]. All components should be expressed as standard uncertainties before being combined. The method used to combine the components requires the formulation of a model that relates the result of the calibration to all quantities that are measured or subject to uncertainty.

When stating the reported uncertainty, it should be expressed as expanded uncertainty. In this case, the level of confidence and the coverage factor should also be stated.

When combining uncertainty components, care should be taken when component values are expressed in decibels. Before combination, the values should ideally be expressed in linear

form (e.g. as a percentage) and not in decibels (dB). The final value of expanded uncertainty can be expressed either as a percentage or converted to decibels as required.

NOTE 1 The use of decibels to express uncertainties can lead to asymmetric distributions (e.g. +1,5 dB is equivalent to +19 %, but –1,5 dB is equivalent to –16 %).

NOTE 2 When each component of uncertainty is small, i.e. much less than 1 dB, the combined uncertainty can be calculated using decibels without significant errors.

F.5 Common sources of uncertainty

List items 1) to 29) below are common sources of uncertainty in the calibration of underwater acoustic **transducers**. The list is not exhaustive, but can be used as a guide when assessing uncertainties for a specific implementation of a calibration method. Depending on the calibration method chosen and its implementation, some (though possibly not all) of these sources will need assessing. For example, the uncertainty from measuring instruments can be minimized by the use of the same measuring channel (amplifier, filter, voltmeter, etc.) for all **signals** and measuring only amplitude ratios. However, since this will not be the case in all implementations, components for these sources of uncertainty have been included in the list.

Once the sources of uncertainty have been identified, each requires assessment by either a Type A or Type B evaluation. In most cases for the components listed below, a Type B evaluation is most appropriate. However, where a parameter has been estimated from repeated measurements (a possible example is the measurement of separation distance in a reciprocity calibration), a Type A evaluation will also be required.

Sources of uncertainty specific to free-field reciprocity calibrations [40] to [43]:

- 1) uncertainty of any assumptions about the acoustic field, e.g. that the field is a spherical-wave field (this can be checked by varying the separation distance between **transducers** and checking that the product of **electrical transfer impedance** and distance is invariant, see 8.2.9.2);
- 2) non-reciprocal behaviour by **transducers** which can be evaluated by checking the equivalence of the Z_{PT} and Z_{TP} electrical transfer impedances (see 8.2.9.1);
- 3) uncertainties in the measurement of the separation distance;
- 4) uncertainties in the values for acoustic frequency (required to calculate the reciprocity parameter);
- 5) uncertainty in the value for water density (required to calculate the reciprocity parameter).

Sources of uncertainty specific to comparison calibrations:

- 6) uncertainties in the calibration of the reference **hydrophone** (a major source of uncertainty in a comparison calibration);
- 7) uncertainty caused by short-term instability of any auxiliary **transducers** used for comparison calibrations (e.g. instability of the output of a **transducer** used as a **projector** in a comparison calibration);
- 8) uncertainty caused by potential instability of the reference **hydrophone** in comparison calibrations (i.e. variation in the sensitivity of the reference device since the previous absolute calibration);
- 9) differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **hydrophone**, which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone** (e.g. temperature, depth, mounting/rigging, etc.).

Sources of uncertainty specific to **hydrophone** calibration by calibrated **projector** method:

- 10) uncertainty of any assumptions about the acoustic field produced by the **projector**, e.g. that the field is a spherical-wave (the calibrated **projector** method is more sensitive to lack of

free-field conditions than comparison with a calibrated **hydrophone**, for example, due to interference from boundary reflections);

- 11) uncertainties in the measurement of the separation distance;
- 12) lack of stability in the **projector** electrical drive conditions, including lack of linearity if the **projector** is driven with a **signal** different than that used in its own absolute calibration;
- 13) instability of the calibrated **projector** (i.e. variation in sensitivity of reference device since previous absolute calibration);
- 14) differences in environmental conditions for the calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **projector** which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone** (e.g. temperature, depth, mounting/rigging, etc.).

Sources of uncertainty common to all above methods [4], [40] to [43]:

- 15) lack of steady-state conditions, especially where bursts of single-frequency sound waves are used (the resonance frequency and Q-factors of the **transducers** and the echo-free time of the tank will influence this contribution);
- 16) interference from acoustic reflections, leading to a lack of free-field conditions;
- 17) lack of **acoustic far-field** conditions;
- 18) the spatial averaging effects of the **hydrophones** under calibration due to their finite size and the lack of perfect plane-wave conditions;
- 19) misalignment, particularly at high frequencies where the **hydrophone** response will be far from omnidirectional;
- 20) acoustic scattering from the **hydrophone** mount (or vibrations picked up and conducted by the mount);
- 21) uncertainty in measurement of the receive voltage (including uncertainty due to the measuring instrumentation (voltmeter, digitizers, etc.);
- 22) uncertainty of the gains of any amplifiers, filters, and digitizers used;
- 23) uncertainties in the measurement of the drive current or voltage;
- 24) uncertainties due to the lack of linearity in the measurement system (the use of a calibrated attenuator to equalize the measured **signals** can significantly reduce this contribution);
- 25) uncertainty of any electrical **signal** attenuators used;
- 26) electrical noise including RF pick-up;
- 27) uncertainty of any electrical loading corrections made to account for loading by extension cables and preamplifiers;
- 28) bubbles or air clinging to **transducers** (this should be minimized by adequate wetting and soaking of **transducers**);
- 29) environmental conditions, such as water temperature and depth of immersion (corrections need not be included for these if the calibration results specify the conditions and state that the calibration is only valid for the conditions stated).

Annex G (informative)

Derivation of the formulae for three-transducer spherical-wave reciprocity calibration

G.1 General

In the reciprocity method, three measurements are made, each involving two (from three) **transducers**, with one **transducer** acting as a transmitting device and the other as a receiving device. One **transducer** (labelled P) is used only as a **projector** or transmitting device, and has unknown transmitting response $\underline{S}_{I,P}$ to current. A second **transducer** (labelled H) is used only as a **hydrophone** or receiving device, and has unknown **free-field receive sensitivity**, $\underline{M}_H$. A third **transducer** (labelled T) is used both as a transmitting and receiving device, and is assumed to be a reciprocal device with unknown **free-field receive sensitivity** $\underline{M}_T$ and unknown transmitting response $\underline{S}_{I,T}$ to current.

The reciprocity method is based on using

- a) the three measurements to provide an estimate of the product of $\underline{M}_T$ and $\underline{S}_{I,T}$ for the **transducer** T, and
- b) the reciprocity principle to provide an estimate of the quotient of $\underline{M}_T$ and $\underline{S}_{I,T}$ given by the free-field reciprocity parameter J .

In terms of the available information (the three measurements and the reciprocity of T), the method provides estimates of $\underline{S}_{I,P}$, $\underline{M}_H$, $\underline{M}_T$ and $\underline{S}_{I,T}$.

G.2 Calibration to determine the modulus of the sensitivity

The application of the reciprocity principle to calibration means that, for any reciprocal **transducer**, the free-field sensitivity divided by the **transmitting response to current** is equal to a known value: the free-field reciprocity parameter [33] to [35]. If the quotient of two quantities is known, as well as their product, the quantities can be calculated.

The product of the free-field sensitivity and the **transmitting response to current** shall be measured with the free-field reciprocity calibration technique, using one **projector**, one **hydrophone** and one reciprocal **transducer**.

Let a current I_P flow through a **projector** P with a **transmitting response to current**, $\underline{S}_{I,P}$. At a distance d from its reference centre and in the reference direction specified in the definition of $\underline{S}_{I,P}$, the **projector** generates a sound pressure p which is calculated by:

$$p = \frac{|\underline{S}_{I,P}| I_P}{d} \quad (\text{G.1})$$

where spherical spreading of the sound energy from the **projector** is assumed.

Place a **hydrophone** H with free-field sensitivity $\underline{M}_H$ in this sound field so that its reference centre is a distance d_1 from the reference centre of the **projector** P, producing an open circuit voltage U_{PH} given by:

$$U_{PH} = |\underline{M}_H|_P = \frac{|\underline{M}_H| |\underline{S}_{I,P}| I_P}{d_1} \quad (G.2)$$

The **electrical transfer impedance** modulus $|\underline{Z}_{PH}|$ of this **transducer** pair is calculated by:

$$|\underline{Z}_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = \frac{|\underline{M}_H| |\underline{S}_{I,P}|}{d_1} \quad (G.3)$$

In a second step, determine the modulus of the **electrical transfer impedance** $|\underline{Z}_{PT}|$ after replacement of the **hydrophone** H by a **reciprocal transducer** T by:

$$|\underline{Z}_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_P} = \frac{|\underline{M}_T| |\underline{S}_{I,P}|}{d_2} \quad (G.4)$$

where d_2 is the distance between the reference centres of the **reciprocal transducer** T and the **projector** P.

In a third step, determine the modulus of the **electrical transfer impedance** $|\underline{Z}_{TH}|$ as follows:

$$|\underline{Z}_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{|\underline{M}_H| |\underline{S}_{I,T}|}{d_3} \quad (G.5)$$

where d_3 is the distance between the reference centre of the **reciprocal transducer** T and the **hydrophone** H. In this case, the **transducer** T is used as a **projector**, and H again as a **hydrophone**.

Now it can easily be shown that:

$$\frac{|\underline{Z}_{PT}| |\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PH}|} = \frac{|\underline{M}_T| |\underline{S}_{I,T}| d_1}{d_2 d_3} \quad (G.6)$$

For a reciprocal **transducer**, the quotient of the moduli of the free-field sensitivity and the **transmitting response to current** is equal to the spherical wave reciprocity parameter $2d_0 / \rho f$ at the reference distance of $d_0 = 1$ m:

$$\frac{|\underline{M}_T|}{|\underline{S}_{I,T}|} = \frac{2}{\rho f} \quad (G.7)$$

where ρ is the density of the water and f is the frequency.

As the product and the quotient of the moduli of the free-field sensitivity $\underline{M}_T$ and the **transmitting response to current** $\underline{S}_{I,T}$ of the **transducer** T are known from Formulae (G.6) and (G.7), the values of the moduli of $\underline{M}_T$ and $\underline{S}_{I,T}$ are calculated from Formulae (G.8) and (G.9) as follows:

$$|M_T|^2 = \frac{2d_2 d_3}{\rho f d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (G.8)$$

$$|S_{I,T}|^2 = \frac{\rho f d_2 d_3}{2d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (G.9)$$

Using Formulae (G.5) and (G.9), the modulus of the sensitivity of the **hydrophone** M_H can be calculated:

$$|M_H|^2 = \frac{2d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (G.10)$$

Similarly, using Formulae (G.3) and (G.10), the modulus of the **transmitting response to current** $S_{I,P}$ of the **projector** P can be calculated:

$$|S_{I,P}|^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2d_3} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{TP}|} \quad (G.11)$$

NOTE 1 A better statistical accuracy is obtained and the reciprocity method can be verified if more than one **transducer** is reciprocal. If, for example, the **projector** P can also be used as a **hydrophone**, the **electrical transfer impedance modulus** $|Z_{TP}|$ can also be determined. Now it can be shown by the principle of reciprocity that $|Z_{TP}|$ is equal to $|Z_{PT}|$. Thus, $|Z_{PT}|$ can also be obtained twice, once using P as a transmitter and T as a receiver and a second time using T as a transmitter and P as a receiver.

Any difference between these two values at the same frequency indicates lack of reciprocity or linearity, or can be due to a measuring error. The uncertainty of the mean value is lower than that of either value alone.

NOTE 2 If the calibration is performed with three reciprocal **transducers** and if two or more are reciprocal, the uncertainty is reduced because the sensitivity can be calculated several times, using independent results from different combinations of **transducers**. The mean value of all results at the same frequency possesses a lower statistical uncertainty than each value alone.

G.3 Calibration to determine the complex sensitivity

The phase angle of the free-field sensitivity can also be determined by extending the measurements to include phase [44], [45].

All of the pressures, input currents, output voltages, electrical transfer impedances, transmitting responses, and free-field sensitivities are now complex; they include both amplitude and phase. For example, Formula (G.1) for the pressure produced by the **projector** P at the **hydrophone** H becomes:

$$p = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{S_{I,P} I_P}{d_1} \quad (G.12)$$

where the distance d_1 is measured from the reference centre of the **projector** to the reference centre of the **hydrophone**, k is the **wavenumber** ($k = 2\pi f/c$), c is the speed of sound in the surrounding medium, and the reference distance d_0 is that used in the definition of the transmitting response (and is equal to 1 m).

The complex **electrical transfer impedance** Z_{PH} is calculated from:

$$\underline{Z}_{PH} = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{\underline{M}_H \underline{S}_{I,P}}{d_1} \quad (\text{G.13})$$

Similarly, calculate the electrical transfer impedances $\underline{Z}_{PT}$ and $\underline{Z}_{TH}$ as follows:

$$\underline{Z}_{PT} = \exp[jk(d_0 - d_2)] \frac{\underline{M}_T \underline{S}_{I,P}}{d_2} \quad (\text{G.14})$$

$$\underline{Z}_{TH} = \exp[jk(d_0 - d_3)] \frac{\underline{M}_H \underline{S}_{I,T}}{d_3} \quad (\text{G.15})$$

where d_2 is the distance between the reference centres of P and T, and d_3 is the distance between the reference centres of T and H.

Formulae (G.13) to (G.15) can be combined to produce the complex equivalent of Formula (G.6):

$$\frac{\underline{Z}_{PT} \underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PH}} = \exp[jk(d_0 + d_1 - d_2 - d_3)] \frac{\underline{M}_T \underline{S}_{I,T} d_1}{d_2 d_3} \quad (\text{G.16})$$

Using the complex spherical wave reciprocity parameter, instead of Formula (G.7):

$$\frac{\underline{M}_T}{\underline{S}_{I,T}} = \frac{2}{j\rho f} \exp[jk d_0] \quad (\text{G.17})$$

Expressions corresponding to Formulae (G.8) and (G.9) can be obtained by combining Formulae (G.18) and (G.19):

$$\underline{M}_T^2 = \frac{2 d_2 d_3}{j\rho f d_1} \frac{\underline{Z}_{PT} \underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PH}} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1)] \quad (\text{G.18})$$

$$\underline{S}_{I,T}^2 = \frac{j\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{\underline{Z}_{PT} \underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PH}} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0)] \quad (\text{G.19})$$

Formulae (G.16), (G.17) and (G.19) can be used to derive the following expression for the complex free-field sensitivity of the **hydrophone** H.

$$\underline{M}_H^2 = \frac{2 d_1 d_3}{j\rho f d_2} \frac{\underline{Z}_{PH} \underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PT}} \exp[jk(d_1 + d_3 - d_2)] \quad (\text{G.20})$$

Similarly, the expression for the transmitting response $\underline{S}_{I,P}$ corresponding to Formula (G.11) can be calculated from:

$$\underline{S}_{I,P}^2 = \frac{j\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{\underline{Z}_{PH} \underline{Z}_{PT}}{\underline{Z}_{TH}} \exp[jk(d_1 + d_2 - d_3 - 2d_0)] \quad (\text{G.21})$$

The difficulty of determining the phase of $\underline{M}_H$ by this method lies in accurately determining both the sound speed and the measurement distances d_1 , d_2 and d_3 . For example, at 100 kHz in water, an error of only 1,0 mm in any one of the distances gives a phase error of about 12°.

To avoid this, position the three **transducers** P, H and T in a straight line with H located between P and T, then $d_2 = d_1 + d_3$. Then Formula (G.20) simplifies to:

$$\underline{M}_H^2 = \frac{2d_1d_3}{j\rho f d_2} \frac{\underline{Z}_{PH}\underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PT}} \quad (\text{G.22})$$

Since the distances and sound speed do not appear explicitly in a phase term in Formula (G.22), the accuracy of the calculated phase of $\underline{M}_H$ is only limited by accuracy of the phase measurements of the voltages and currents and by positioning.

The modulus alone of the sensitivity $|\underline{M}_H|$ is calculated from Formula (G.10).

The phase angle alone of the **hydrophone** sensitivity, θ_H , is calculated from:

$$\theta_H = \frac{1}{2} \left(\Delta\theta_{PH} + \Delta\theta_{TH} - \Delta\theta_{PT} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{G.23})$$

where θ_{PH} is the phase angle of $\underline{Z}_{PH}$, etc.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

Annex H (informative)

Calibration using travelling-wave tubes

H.1 General

Hydrophones can be calibrated at low frequencies in terms of the response to a plane-wave propagating in a travelling-wave tube. With care, such techniques can be used in the frequency range of 1 Hz to 4 kHz.

In the method, a cylindrical, water-filled acoustic waveguide is used to confine the acoustic travelling waves into a plane-wave geometry. A source **transducer** in one end is used to generate the travelling wave. The other end can be terminated by an absorber, however a more common implementation is to terminate the end with another active **transducer**. Suitable drive **signals** applied to the two **transducers** enable the desired acoustic field to be generated in the tube, the field being monitored by small monitor **hydrophones**. In this way the acoustic pressure and particle velocity can be adjusted to match that of a plane progressive wave. A **hydrophone** inserted into the tube can then be calibrated by exposure to the known acoustic field [67] to [76].

H.2 Calibration procedure

The travelling-wave tube is constructed with thick walls in order to be acoustically rigid. If the walls are not sufficiently rigid, corrections are made to account for this [74].

Two **transducers** are used, one in each end, to generate the travelling wave, with the resulting acoustic field sampled by a number of monitor **hydrophones** placed along the inside of the walls of the tube. The use of these two end source **transducers** (with data obtained from the array of monitor **hydrophones** informing the amplitude and phase of the drive **signals**) allows the creation of the travelling wave mode of operation. This travelling wave mode simulates a wave in unbounded free space (a simulated free-field measurement).

The desired values for the amplitudes and phases of the drive **signals** are those which represent the monitor **hydrophones**' outputs if the incident sound is completely absorbed at the secondary source. The travelling wave mode is characterized by having equal amplitude **signals** at each of the reference **hydrophone** locations, and appropriate phase delays between the various **hydrophone** locations as dictated by the **hydrophones**' relative positions, the test frequency and the sound speed of the test medium. The relationship between the drive **signals** and the **hydrophone signals** represents an overdetermined system of equations which can be solved in a least squares sense to provide a solution which realizes a travelling wave in the tube.

Receive sensitivity measurements can be conducted in the travelling-wave tube by exposing both the **hydrophone** under test and a reference **hydrophone** (for which the receive sensitivity has been calibrated prior to its use) simultaneously to a common acoustic field. By calculating the ratio of output voltages from both the **hydrophone** under test and the reference **hydrophone** and knowing the reference **hydrophone** sensitivity, the sensitivity of the **hydrophone** under test can be computed.

H.3 Limitations of the method

There are limitations in creating the travelling wave mode for some **signal** frequencies. This is caused by acoustic modes that are established by the physical dimensions of the test vessel that hinder the ability to create a travelling wave. These limitations in frequency correspond to the ones that occur at natural resonances of the test vessel. Typically, this first occurs at the

frequency that corresponds to the half wavelength resonance set by the length of the tube. An inability to support a uniform pressure field across the cross section of the test vessel typically sets the upper frequency limit of operation [75].

Another limitation pertains to the aperture length of the **hydrophone** under test (the physical length of the **hydrophone** sensing element). For a comparison calibration technique, the reference **hydrophone** sensing element and the **hydrophone** under test are exposed to the same pressure field. If the aperture length of the **hydrophone** under test is significantly long compared to the wavelength of the test frequency applied and the aperture of the reference **hydrophone**, the **hydrophone** under test would be exposed to a varying acoustic pressure field across its length. This effect is most pronounced at the higher test frequencies and modifies the reported device sensitivity [75].

H.4 Extensions of the method

If the tube can be pressurized and if there is control of water temperature, this type of facility allows these characterizations under realistic ocean environmental conditions of both temperature and hydrostatic pressure [75].

The mechanism by which the travelling wave mode is generated can be modified to create other desired sound fields. These fields can include the creation of localized "sound pressure fields" or "sound particle velocity" fields. The former is representative of the characteristics of the standing wave mode but without the need to collocate the reference and unknown near the rigid boundary at one of the vessel ends. The latter acoustic field provides a means to more rigorously assess the velocity sensitivity of a device.

This measurement technique can also be augmented to include the characterization of material properties such as insertion loss [76].

Annex I (informative)

Calibration of hydrophones using optical interferometry

I.1 General

Annex I describes novel absolute methods of calibration for **hydrophones** based on optical interferometry. They are currently the subject of research and will be more widely available in the future. The methods are primarily used over the frequency range from 100 kHz to 1 MHz, but reports in the scientific literature have shown that good performance is possible at frequencies down to tens of kilohertz [77] to [79]. Such techniques have also been employed in specialized implementations for primary calibration of miniature ultrasonic **hydrophones** used in medical ultrasound at frequencies up to 100 MHz [80] to [84] and a description of the techniques is partly covered in Annex F of IEC 62127-2:2013 [2].

I.2 General principles

In the method, either the acoustic particle velocity or displacement in the far-field of an acoustic source **transducer** is determined by measuring the motion of an optically reflective and acoustically transparent membrane suspended in the acoustic field. The acoustic pressure is calculated, and then a **hydrophone** is positioned at the same point in the acoustic field that has been interrogated by the optical beam, and the **hydrophone** voltage is measured. The free-field **hydrophone** sensitivity is then calculated from the quotient of the **hydrophone** voltage and the acoustic pressure [77]. The method can be used to measure the complex-valued free-field **hydrophone** receive sensitivity [45], [82], [84].

I.3 Procedure

An acoustically-transparent plastic membrane is placed in the far-field of an acoustic **projector**. The membrane is thin enough (a few micrometres) that it follows the acoustic particle motion as the sound wave passes by. The membrane (usually termed a "pellicle") is also coated in a thin layer of an optically reflecting layer (a few tens of nanometres thick) which reflects the optical beam from an interferometer. The interferometer measures the motion of the pellicle membrane, from which the acoustic pressure can be calculated. The optical interferometer can either be a heterodyne or homodyne configuration.

In the heterodyne interferometer, the optical beam reflected from the pellicle target is mixed with a frequency-shifted version of itself, and the interferometer output contains the Doppler-shifted difference frequency which is demodulated to produce a **signal** that is proportional to the velocity of the pellicle, u . The pellicle is then removed and the **hydrophone** is placed in the acoustic field at the same position as was measured by the interferometer, and the **hydrophone** sensitivity, M_H , is given by the following expression (assuming plane-wave conditions):

$$|M_H| = \frac{V_H}{\rho c u} \quad (I.1)$$

where ρ is the density of water, c is the speed of sound.

In the case of the homodyne interferometer, the optical beam reflected from the pellicle is mixed with an unshifted version of itself created with a beam splitter, and the phase of the optical **signal** is measured, the phase being proportional to the displacement of the pellicle. The acoustic particle velocity is then calculated by differentiating the displacement (the amplitude of the sinusoidal velocity differs from that of the displacement by a factor equal to the angular frequency (equal to $2\pi f$)).

The optical methods lend themselves to the measurement of **hydrophone** phase response, but such measurements require very careful positioning of the **hydrophone** and pellicle and knowledge of the position of the acoustic centre of the **hydrophone** element [45]. Figure I.1 shows schematic diagrams of the interferometers and the configuration for measurements.

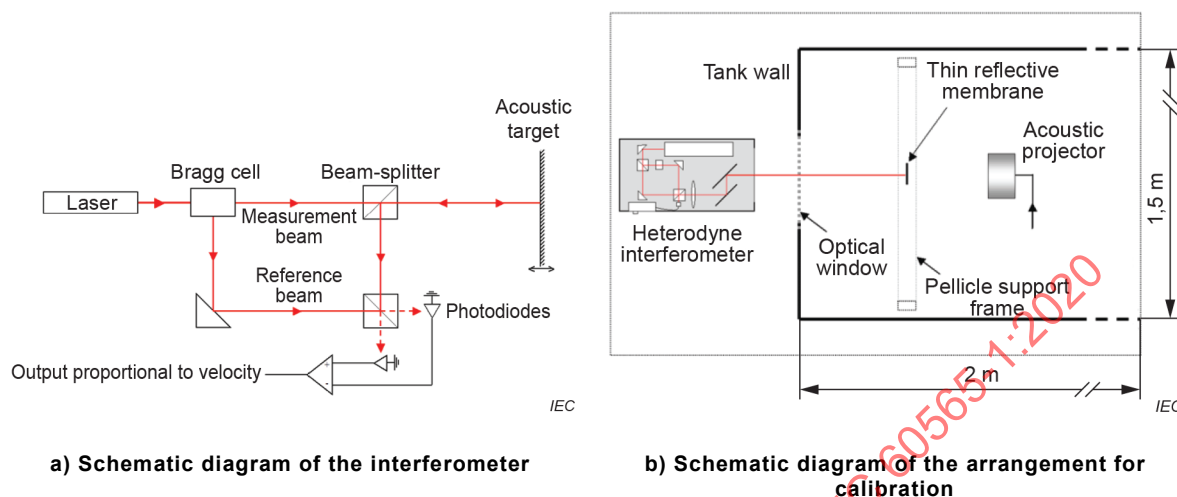


Figure I.1 – Configurations for calibration of hydrophones using heterodyne optical interferometry

I.4 Discussion of method

The method has an advantage over reciprocity methods because it does not rely on the use of an artefact with a prescribed performance (a **transducer** which is reciprocal), and nor is the method reliant on the existence of a specific field geometry (a spherical-wave or plane-wave). The method does realize the primary unit of sound pressure directly and is traceable to primary standards of length through the wavelength of the laser light.

However, the method is more complicated to implement than a reciprocity calibration, requiring an optical interferometer with access to the test tank via an optical window or delivery via an optical fibre. The ability to position the optical beam and the **hydrophone** at the same point of the acoustic field is important, and requires a precision positioning system for **hydrophone** and pellicle and possibly the use of laser alignment optics.

The acoustic performance of the pellicle and the approximation to plane-wave conditions are not usually a significant problem in the frequency range 100 kHz to 1 MHz, but can be a greater source of uncertainty at megahertz frequencies [77]. For a homodyne interferometer, anti-vibration mitigation measures will need to be taken and, because the response is typically calibrated by driving the system over an optical fringe at low frequencies, the frequency response of the photodiode detectors is important [80].

Nevertheless, optical calibration for **hydrophones** has been implemented at a number of specialist metrology laboratories, and successful comparisons with other methods have been reported in the scientific literature [71] to [76].

Annex J (informative)

Calibration in a reverberant water tanks using continuous signals

J.1 General principle

In 5.2.1, 5.4 and 5.8.2, and in Annex E, references were made to **signal**-processing techniques which include calibration methods in reverberant water tanks with reflective boundaries which make use of continuous **signals**. These are typically broadband in nature (with the acoustic power distributed over a frequency band). In contrast to the discrete-frequency tone-burst method, usage of such **signals** and special post-processing techniques provide an ability to obtain high-resolution **transducer** frequency responses more quickly, including at frequencies that are lower than conventionally available to the tone-burst method [85] to [90].

Usually the arrival times of the first acoustic reflections that reach the **hydrophone** receiver from the water tank boundaries can be determined quite accurately. For a specified reflection that is delayed relative to the direct **signal** by a time Δt , one can apply a moving average with a frequency interval of Δf (where $\Delta f = 1/\Delta t$) to the frequency-dependent **electrical transfer impedance** of the projector-**hydrophone** pair (hereinafter referred to as ETI) in the reverberant sound field of the water tank. By doing so, the effect of this reflection on the frequency dependence can be eliminated, and the effect of the later reflections can be weakened. If such averaging is applied to several significant reflections, then it is possible to sufficiently suppress the influence of all reflections arriving at the **hydrophone** receiver. As a result of such processing, the frequency dependence of the free-field ETI can be estimated. In practice, it is sufficient to suppress the influence of the first three significant reflections, the time delays of which should be known exactly from geometrical considerations. For such measurements, the projector and **hydrophone** cannot be considered point-like, so calculating the time delays over distances travelled by reflected sound waves will not in general be accurate enough.

In order to obtain an unbiased estimation of the free-field ETI, it is necessary to average the complex frequency dependence of the reverberant-field ETI. To obtain a complex dependence, one can use, for example, the Fourier transform of a radiated noise **signal**. Another way is to radiate alternately two linear-frequency modulated (LFM) **signals** (sine and cosine), which are then combined into a complex **signal**.

If the desired free-field frequency dependence has significant slopes, peaks and dips, the dependence obtained as a result of the averaging will differ from the ideal one. However, these differences can be less than when measured by the tone-burst method.

The averaging distortions of the desired free-field dependence will be negligible if the desired dependence is plane. Therefore, the corrections are applied to the measured frequency dependence of the reverberant-field ETI before it is averaged. For example, the dependences include: the frequency dependences of the projector current and reciprocity parameter, and the frequency dependence of free-field ETI.

Such post-processing is called the method of complex moving weighted average (CMWA) [85] to [89]. The measurement and post-processing procedures consist of the following stages.

- a) The projector and **hydrophone** should be located in the water tank in the same way as for calibration by a discrete-frequency tone-burst method, and the arrangement of the **transducers** during the experiment is not changed. When the projector and receiver are optimally positioned, the time delay of the first reflection relative to the projector direct **signal** should be maximized. The time delay of the projector-**hydrophone** direct **signal** t_d , and the time delays t_k of the reflections, whose influence is to be suppressed, are determined relative to the radiation start.

- b) A continuous **signal** (or a pair of **signals**) with the power distributed in the frequency band is radiated, and the complex frequency dependence of the ETI in the reverberant sound field is calculated.
- c) For the k th suppressed reflection, a moving average of the complex frequency dependence of reverberant-field ETI in the frequency interval $\Delta f = 1/(t_k - t_d)$ is performed. The results of the moving averaging operation are ascribed to the midpoints of the averaging frequency interval (the repetition of the moving averaging operations is equivalent to a single moving weighted averaging).

The longer the time delay of the suppressed reflection is, the larger the number of points that will appear in the frequency interval of weighted averaging. To do this, it is necessary to register the detailed frequency dependence in the reverberant sound field (usually a few hundred points in the weighted averaging frequency interval are sufficient). If there is a specific frequency range in which it is desirable for the free-field frequency dependence to be obtained, measurements are then made over a broader frequency range, which is greater by half of the width of the weighted averaging frequency interval at both the lower and upper frequency bounds.

J.2 Using a noise signal

If measurements are to be performed on a stationary **signal**, then radiation of continuous or repeating stationary noise is preferable. Since the direct and reflected sound waves coming to the receiver during its calibration in the water tank are created by one projector, the complex frequency dependence of the ETI is obtained on the basis of the four-pole model of the projector-receiver pair in a reverberant sound field of the water tank.

The instantaneous spectra of the projector current $S_i(f)$ and the **hydrophone** receiver output voltage $R_i(f)$ are determined. To do this, Fourier transforms of time-domain **signals** are usually performed. The instantaneous power spectrum of the projector excitation current $S_i(f)^2 = S_i(f)S_i(f)^*$ is calculated (where $S_i(f)^*$ is the complex conjugate of $S_i(f)$) and the cross-spectrum of the projector current and the receiver voltage $R_i(f)S_i(f)^*$ is also calculated.

By averaging over a number of realizations, the estimates of average current power spectrum $\langle |S_i(f)|^2 \rangle$ and cross-spectrum $\langle R_i(f)S_i(f)^* \rangle$ are obtained (where $\langle \dots \rangle$ represents averaging over the realizations). The frequency dependence of the complex reverberant-field ETI $Z_{rf}(f)$ is calculated by the formula:

$$Z_{rf}(f) = \frac{R_i(f)S_i(f)^*}{|S_i(f)|^2} \quad (\text{J.1})$$

The frequency dependence of the complex free-field ETI $Z_{ff}(f)$ is obtained by processing of the frequency dependence of the complex reverberant-field ETI $Z_{rf}(f)$ by the CMWA method.

J.3 Using the LFM signal

When using Fourier transformation, for example by a fast Fourier transform (FFT), the resolution of the obtained spectrum is finite and inversely proportional to the duration of the time-domain **signals** to be processed. In order to obtain the required number of samples in the frequency interval for the weighted averaging process, the duration of time-domain **signal** which is to be processed by the FFT is chosen to be long. The transmission of a linearly frequency-modulated (LFM) **signal** allows a large number of points to be obtained in the frequency interval of the averaging process without using an FFT. The generation of the transmitted **signals** is based on representing the LFM **signal** as a complex sum of the real and imaginary parts, specifically by use of cosine and sine functions, with the LFM **signals** forming a quadrature supplemented pair.

In the procedure, the projector is alternately excited by the cosine and sine LFM **signals**. The radiation of the **signals** is separated by a pause exceeding the reverberation time in the water tank. The time-domain **signals** of the projector currents $I_{\cos}(t)$ and $I_{\sin}(t)$ and the receiver output voltages $U_{\cos}(t)$ and $U_{\sin}(t)$ are captured and recorded. Based on these **signal** waveforms, complex **signals** can be constructed of current $I(t) = I_{\cos}(t) + jI_{\sin}(t)$ and voltage $U(t) = U_{\cos}(t - t_d)$ and $U_{\sin}(t - t_d)$ (taking into account the time delay t_d for acoustic propagation of the direct projector-hydrophone **signal**). Then, the operation $Z(t) = U(t)/I(t)$ is performed. Based on the LFM **signal** parameters, the variable t (time) in the obtained $Z(t)$ dependence is replaced by the variable f (frequency):

$$Z_{\text{rf}}(f) = Z(t)|_{t \rightarrow f} \quad (\text{J.2})$$

The obtained complex frequency dependence of the reverberant-field ETI $Z_{\text{rf}}(f)$ is then processed by the CMWA method. To improve the **signal**-to-noise ratio of measurement, coherent averaging of received **signals** is used, and for that reason the transmission of the LFM **signals** is repeated several times.

J.4 Uncertainties

When transmitting an LFM **signal**, the uncertainty of calibration will increase for resonant **transducers**. In this situation, the measurement result depends on the rate of frequency change in the LFM **signal**, and the uncertainty can be improved by performing additional experiments with a slower rate of frequency change. Measurements using noise **signals** increasingly lose in noise immunity (and suffer from poorer **signal**-to-noise) compared to the LFM **signal** measurements, but they enable results to be obtained rapidly over a wide frequency range.

The sound field during transmission of the LFM **signal** in a water tank is a non-stationary reverberant field, since the instantaneous frequencies of the direct and reflected LFM **signals** are constantly changing and never coincide, and this can also lead to an increase in the uncertainty of calibration. Using the stationary noise **signal** overcomes this disadvantage of using the LFM **signal**.

Bibliography

- [1] IEC 60565-2, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration*
- [2] IEC 62127-2, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz*
- [3] ANSI S1.20:2012, *Procedures for Calibration of Underwater Electroacoustic Transducers*. New York: American National Standards Institute, 2012.
- [4] BOBBER, R.J. *Underwater electroacoustic measurements*. Los Altos CA: Peninsula Press, 1988.
- [5] URICK, R. J. *Principles of underwater sound for engineers*. McGraw-Hill: New York, 1967.
- [6] GIANGRECO, C. *Mesures acoustiques appliquées aux antennes sonar*. Lavoisier: Paris, 1997.
- [7] SABIN, G.A. Calibration of piston transducers at marginal test distances. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, vol. 36, p. 168.
- [8] SOROKIN, V.I. Determination of the sensitivity of cylindrical transducers in marginal-distance calibrations. *Sov. Phys. Acoust.*, 1973, vol. 19, p. 274.
- [9] FOOTE, K.G. Discriminating between the nearfield and the far-field of acoustic transducers, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2014, vol. 136, p. 1511–1517.
- [10] ROBINSON S.P. et al. An international key comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 1 kHz to 500 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, vol 120, p. 1366–1373
- [11] DEL GROSSO, V.A. and MADER, C.W. Speed of sound in pure water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972, vol. 52, p. 1442–1446.
- [12] BILANIUK, N. and WONG, G.S.K. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, vol. 93, p. 2306.
- [13] LEROY, C.C., ROBINSON, S.P. and GOLDSMITH, M.J. A new simple equation using depth and latitude for the accurate calculation of sound speed in all ocean acoustics applications. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, vol 124, p. 2774–2782.
- [14] LEROY, C.C., ROBINSON, S.P. and GOLDSMITH, M.J. Erratum: A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. [*J. Acoust. Soc. Am.* 124(5), 2774–2783 (2008)] *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, vol. 126, p. 2117.
- [15] ISAEV A.E., MATVEEV A.N., SMELOV V.A. and SHCHELKUNOV A.I. Reduction of the error of hydrophone calibration with respect to the field in a hydroacoustic tank by the reciprocity method. *Acoustical Physics*, 2004, vol. 50, p. 535–543.
- [16] ISAEV A.E. The sensitivity and characteristic size of a hydrophone in the frequency band when there are sources of reflections. *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, p. 1227–1234.

- [17] PINKERTON, J.M.M. The absorption of ultrasonic waves and liquids and its relation to molecular constitution. *Proc. Phys. Soc.*, 1949, vol. 62, p. 129–141.
- [18] SCHULKIN, M., and MARSH, H.W. Absorption of sound in seawater. *J. Brit. IRE*, 1963, vol. 25, p.493, and *J. Acoust. Soc. Am.*, 1962, vol. 34, p. 864.
- [19] FISHER F.H. and SIMMONS V.P. Sound absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, vol. 62, p. 558–564.
- [20] FRANCOIS R.E. and GARRISON G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72, 1982, p. 896–907.
- [21] FRANCOIS R.E. and GARRISON G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, p. 1879–1890.
- [22] AINSLIE M.A. and MCCOLM J.G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 103, p. 1671–1672.
- [23] HAYMAN G., GÉLAT P.N., MOORE G.R., WELLS G.O. and ROBINSON S.P. A method for correcting the complex electrical impedance and open-circuit sensitivity of a hydrophone for the effect of added extension cable. 2007, *Meas. Sci. Technol.* vol. 18, p. N47–N52.
- [24] IVEY, L.E. and THOMPSON, C.M. Underwater transducer wetting agents. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, 78, p. 389–394.
- [25] VAN BUREN, A.L., DRAKE, R.M. and PAOLERO, A.E. Temperature dependence of the sensitivity of hydrophone standards used in international comparisons. *Metrologia*, 36, 1999, p. 281–295.
- [26] BEAMISS, G.A. ROBINSON, S.P. HAYMAN, G. and ESWARD, T.J. Determination of the Variation in Free-Field Hydrophone Response with Temperature and Depth. *Acta Acustica united with Acustica*, 88, 2002, p. 799.
- [27] NAM G.H. et al. A model for characterising the frequency dependent variation in sensitivity with temperature of underwater acoustic transducers from historical calibration data. *Meas. Sci. Technol.* 2007, vol. 18, p. 1553–1562.
- [28] BALLANTINE, S. Reciprocity in electromagnetic, mechanical, acoustical and interconnected systems. *Proc. Inst. Radio Engineers*, 17, 1929, p. 929–951.
- [29] MACLEAN, W.R. Absolute measurement of sound without a primary standard. *J. Acoust. Soc. Am.*, 12, 1940, p. 140.
- [30] FOLDY, L.L., and PRIMAKOFF, H. General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem, I. *J. Acoust. Soc. Am.*, 17, 1945, p. 109.
- [31] PRIMAKOFF, H., and FOLDY, L.L. General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem, II. *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 1947, p. 50.
- [32] EBAUGH, P., and MUESER, R.E. The practical application of the reciprocity theorem in the calibration of underwater sound transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 1947, p. 695.

- [33] BOBBER, R.J., and SABIN, G.A. Cylindrical wave reciprocity parameter. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 1956, p. 705.
- [34] SIMMONS, B.D., and URICK, R.J. Plane wave reciprocity parameter and its application to calibration of electroacoustic transducers at close distances. *J. Acoust. Soc. Am.*, 21, 1949, p. 633.
- [35] BOBBER, R.J. General reciprocity parameter. *J. Acoust. Soc. Am.*, 39, 1966, p. 680.
- [36] GOLENKOV, A.N., and PAVLOV, L.E. A facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free-field (in Russian). *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1, 1969, p. 79. [English translation: *Measurement Techniques*, 12, 1969, p. 109.]
- [37] CARTENSEN, E.L. Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 1947, p. 961.
- [38] SIMMONS, B.D., and URICK, R.J. Plane wave reciprocity parameter and its application to calibration of electroacoustic transducers at close distances. *J. Acoust. Soc. Am.*, 21, 1949, p. 633.
- [39] PATTERSON, R.B. Using the ocean surface as a reflector for self-reciprocity calibration of transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 42, 1967, p. 653.
- [40] ROBINSON, S.P. and DORÉ, G.R. Uncertainties in the calibration of hydrophones at NPL by the method of three-transducer spherical-wave reciprocity. NPL Report RSA(EXT) 054, National Physical Laboratory, 1992.
- [41] HARRIS, P.M., HAYMAN, G., ROBINSON, S. and SMITH, I. Uncertainty evaluation of an underwater acoustic transducer by the method of free-field reciprocity, NPL Report MS9, National Physical Laboratory, October 2010.
- [42] ROBINSON, S.P., HARRIS, P.M., HAYMAN, G. and ABLITT, J. Evaluation of uncertainty in the free-field calibration of hydrophones by the three-transducer spherical wave reciprocity method, *Proceedings of INTERNOISE2016*, p.7073-7082, Hamburg, August, 2016. ISBN Online 978-3-939296-11-9.
- [43] ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [44] LUKER, L.D. and VAN BUREN, A.L. Phase calibration of hydrophones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, vol. 70, p. 519.
- [45] HAYMAN G., WANG Y. and ROBINSON S. P. A comparison of two methods for phase response calibration of hydrophones in the frequency range 10–400 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2013, vol. 133, p. 750–759.
- [46] ISAEV, A.E., MATVEEV, A.N., POLIKARPOV, A.M. and SHCHERBLYUK, N.G. Measurement of the sensitivity phase-frequency characteristics of hydrophones by the reciprocity method. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56 (6), p. 706–711.
- [47] ROBINSON, S.P. et al. International comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 10 kHz to 315 kHz. *Metrologia*, 1999, vol. 36, p. 287–296.
- [48] ENYAKOV, A.M. et al. A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods. *Metrologia*, 1999, 36, p. 297–303.

- [49] CHEN Y.I., ISAEV A.E., WANG Y. The COOMET Pilot Comparison 473/RU-1/09: Comparison of hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 200 kHz. *Metrologia. Tech. Suppl.*, 2011, vol. 48, 09004.
- [50] ISAEV A.E., CHEN Y., MATVEEV A.N. and PING Z. COOMET.AUV.W-S1 supplementary comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 250 Hz to 8 kHz. *Metrologia*, 2015, 52, 09001.
- [51] MALARKODI A. et al. Interlaboratory Comparisons of Hydrophone Calibration in the 3–500 kHz Frequency Range. *Measurement Techniques*, 2016, 59, p. 99–103.
- [52] MOLLOY, C.T. Calculation of the directivity index for various types of radiators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1948, 20, p. 387.
- [53] KENDIG, P.M. and MUESER, R.E. A simplified method for determining transducer directivity index. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1947, vol. 19, p. 691.
- [54] FAHY, F. Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press, 2001.
- [55] ISAEV A.E. Optimization of the underwater structures employed when calibrating hydrophones in a free-field. *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50 (1), p. 85–90.
- [56] ISAEV A.E. A modified procedure of the reciprocity method for calibrating hydrophones in a free-field. *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50 (12), p. 1320–1325.
- [57] ROBB G.B.N. et al. Absolute calibration of hydrophones immersed in sandy sediment. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125 (5), 2009, p. 2918–2927.
- [58] ROBINSON, S.P., HAYMAN G., HARRIS P.M and BEAMISS G.A. Signal-modelling methods applied to the calibration of hydrophones and projectors in laboratory test tanks in the frequency range 250 Hz to 5 kHz. *Meas. Sci. Technol.*, 2018, 29, 085001, <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aac752>.
- [59] AINSLEIGH, P.L. and GEORGE, J.D. Signal modelling in reverberant environments with application to underwater electroacoustic transducer calibration. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, vol. 98, p. 270–279.
- [60] ROBINSON, S.P. Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks. NPL Report CMAM 034, National Physical Laboratory, June 1999.
- [61] PIQUETTE, J.C. Method for transducer transient suppression. I: Theory. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, vol. 92, p. 1203–1213.
- [62] PIQUETTE, J.C. Method for transducer transient suppression. II: Experiment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, vol. 92, p. 1214–1221.
- [63] HEYSER, R. Acoustical measurements by time-delay spectrometry. *J. Audio Eng. Soc.*, 1967, vol. 15, p. 370–382.
- [64] LUDWIG, G. and BRENDL, K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1988, vol. 35, p. 168–174.
- [65] MCMAHON, G.W. and HODSON, C. Hydrophone calibration system using pseudorandom Gaussian noise signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, vol. 61, p. 1649–1651.

- [66] ISAEV A.E. and CHERNIKOV I.V. Laboratory calibration of an underwater sound receiver in the reverberation field of noise signal. *Acoustical Physics*, 2015, vol. 61 (6), p. 699–706.
- [67] BEATTY L.G. Acoustic impedance in a rigid-walled cylindrical sound channel terminated at both ends with active transducers. *J. Acoust. Soc. Am.* 1964, 36, p. 1081–1089.
- [68] BEATTY L.G., BOBBER R.J. and PHILLIPS D.L. Sonar Transducer Calibration in a High-Pressure Tube. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, vol. 39, p. 48–54
- [69] BEATTY L.G. Reciprocity Calibration in a Tube with Active-Impedance Termination, *J. Acoust. Soc. Am.* 1966, vol. 39, p. 40–47
- [70] BEATTY, L.G. Acoustic impedance in a rigid-walled cylindrical sound channel terminated at both ends with active transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, vol. 36, p. 1081–1089.
- [71] BOBBER, R.J. An Active Transducer as a Characteristic Impedance of an Acoustic Transmission Line. *J. Acoust. Soc. Am.* 1970, vol. 48, p. 317–324
- [72] DMITREVSKII, N.N. and SIL'VESTROV, S.V. Error estimation of travelling-wave equipment in the active-impedance termination method, *Measurement Techniques*, 1978, vol. 21, p. 1146–1148 (translated from *Akust. Zh.*, 20, No. 6, 1974).
- [73] DMITREVSKII, N.N., PAVLOV, L.E. and SIL'VESTROV, S.V. Hydrophone calibration in a chamber with active-impedance termination. *Measurement Techniques*, 1975, vol. 18, p. 1072–1074 (translated from *Izmer. Tekh.*, No. 7, 1975).
- [74] FINNERAN, J.J. and HASTINGS, M.C. Active impedance control within a cylindrical waveguide for generation of low-frequency, underwater plane travelling waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 105, p. 3035–3043
- [75] DRAKE R.M. and FORSYTHE S.E. Low frequency hydrophone calibration in a standing/travelling wave tube. 2007, *Proceedings of UAM2007*, 2007.
- [76] PIQUETTE J.C. and FORSYTHE, S.E. Low-frequency echo-reduction and insertion-loss measurements from small passive-material samples under ocean environmental temperatures and hydrostatic pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, vol. 110, p. 1998–2006.
- [77] THEOBALD P.D. et al. Calibration of hydrophones by an optical technique in the frequency range 10 kHz to 600 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, vol. 118, p. 3110–3116.
- [78] ROBINSON S.P. and THEOBALD P.D.. Validation of primary hydrophone calibrations by inter-laboratory comparisons and by independent calibration methods. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, vol. 123, p. 3346, [Full paper reproduced in: *Proceedings of the 9th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA2008)*, ed. M. Zakaria, pub. Société Française d'Acoustique, vol. 1, p. 125–130, July 2008.]
- [79] KOUKOULAS, T., ROBINSON, S., RAJAGOPAL, S. and ZEQRIRI, B. A comparison between heterodyne and homodyne interferometry to realise the SI unit of acoustic pressure in water. *Metrologia*, 2016, vol. 53, p. 891–898.
- [80] PRESTON, R.C. et al. Primary calibration of membrane hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 60 MHz. *Metrologia*, 1999, vol. 36, p. 331–343

- [81] ESWARD, T.J. and ROBINSON, S.P. Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1999, vol. 46, p. 737–744.
- [82] WILKENS, V. and KOCH, C. Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, p. 2892–2903.
- [83] KOCH, C. and MOLKENSTRUCK, W. Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1999, vol. 46, p. 1303–1314.
- [84] WEBER, M. and WILKENS, V. Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of hydrophones in amplitude and phase. *Metrologia*, 2017, vol. 54, p. 432–444.
- [85] ISAEV A.E. and MATVEYEV A.N. Two approaches to the continuous-radiation field calibration of a hydrophone in a non-anechoic water tank. *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51 (12), p. 1329–1336.
- [86] ISAEV A.E. and MATVEEV A.N. Calibration of hydrophones in a field with continuous radiation in a reverberating Pool. *Acoustical Physics*, 2009, vol. 55 (6), p. 762–770.
- [87] ISAEV, A.E. Lower frequency of free-field calibration of Hydrophones in emission of tonal signals in non-anechoic water tank. *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53 (1), p. 28–34.
- [88] ISAEV A.E. Reducing the influence of a transition process in field calibration of hydrophones at low frequencies with the use of quadrature-added harmonic signals. *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53 (4), p. 379–385.
- [89] ISAEV A.E. and MATVEYEV A.N. Increasing the Frequency Resolution in the Processing of Acoustic Signals by Sliding Complex Weighted Averaging. *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56 (2), p. 246–252.
- [90] ISAEV A. E. and NIKOLAENKO A. S. Laboratory free-field calibration of a hydroacoustic receiver at low frequencies. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61 (2), p. 72–78.
-

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	Incertaince déclarée	162
F.5	Sources communes d'incertitude	163
Annexe G (informative) Dédution 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

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*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-801 et l'IEC 60500:2017 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

champ acoustique lointain

champ acoustique situé à une distance suffisante d'une source sonore dans un milieu uniforme dans lequel la pression acoustique et la vitesse d'une particule sont pratiquement en phase et où l'amplitude de pression acoustique directe, compensée pour la perte d'absorption, varie de manière réciproque en fonction de la distance

Note 1 à l'article: La plage (distance par rapport à la source) est prise le long d'un trajet direct entre la source et le récepteur.

Note 2 à l'article: La dépendance inverse de la plage n'implique pas que la source rayonne de manière égale dans toutes les directions.

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-23-30, modifié – Dans la définition, ajout de "et où l'amplitude de pression acoustique directe, compensée pour la perte d'absorption, varie de manière réciproque en fonction de la distance", issue de l'ISO 18405:2017.]

3.2

impédance électrique de transfert

Z_{PH}

<d'un couple de transducteurs> quotient de la transformée de Fourier de la tension de sortie en circuit ouvert de l'**hydrophone** $\mathcal{F}(U_H(t))$ sur la transformée de Fourier du courant électrique d'attaque à travers le **projecteur** $\mathcal{F}(I_P(t))$, pour un couple de **transducteurs** à une distance de séparation spécifiée, l'un faisant office d'**hydrophone** et l'autre de **projecteur**

$$Z_{PH} = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} \quad (1)$$

Note 1 à l'article: L'**impédance électrique de transfert** est un paramètre à valeur complexe. Le module de l'**impédance électrique de transfert** est exprimé en unités d'ohm, Ω . Le déphasage de l'**impédance électrique de transfert** est l'argument de l'**impédance électrique de transfert** et représente la différence de phase entre la tension de l'**hydrophone** et le courant du **projecteur** [IEC 60050-351:2013, 351-45-45]. L'unité du déphasage est le radian.

Note 2 à l'article: L'**impédance électrique de transfert** dépendant des conditions de champ, de la pression hydrostatique, de la température de l'eau et de la longueur du câble relié au **transducteur**, ces paramètres, ainsi que la fréquence, sont spécifiés.

Note 3 à l'article: Dans un champ acoustique à propagation sphérique, l'**impédance électrique de transfert** du couple de **transducteurs** dépend de la distance entre la source et le récepteur, le module variant de façon inversement proportionnelle à la distance de séparation d et le déphasage variant selon $\exp(jkd)$, où j est la racine carrée de -1 et k est le **nombre d'onde** (voir 3.14).

3.3

transducteur électroacoustique sous-marin

transducteur électroacoustique

transducteur sous-marin

transducteur

appareil qui transforme les **signaux** électriques en **signaux** acoustiques dans l'eau, ou inversement

Note 1 à l'article: Un **transducteur électroacoustique** utilisé comme récepteur acoustique dans l'eau est appelé **hydrophone**.

Note 2 à l'article: Un **transducteur électroacoustique** utilisé comme émetteur acoustique dans l'eau est appelé **projecteur**.

3.4

sensibilité de réception en champ libre

M_f

<d'un **hydrophone**> quotient de la transformée de Fourier du **signal** de tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** $\mathcal{F}(U_H(t))$ sur la transformée de Fourier du **signal** de pression acoustique $\mathcal{F}(p(t))$, pour une fréquence donnée et une direction spécifiée d'un son à onde plane incident à l'emplacement du centre de référence de l'**hydrophone** dans le champ libre non perturbé si ce dernier a été retiré

$$\underline{M}_f = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité de réception en champ libre** de l'**hydrophone** est un paramètre à valeur complexe. Le module de la **sensibilité de réception en champ libre** d'un **hydrophone** est exprimé en unités de volt par pascal, $V \cdot Pa^{-1}$. Le déphasage est l'argument de la sensibilité. Il représente la différence de phase entre la tension électrique de l'**hydrophone** et la pression acoustique. L'unité du déphasage est le radian.

Note 2 à l'article: Le terme "réponse" est parfois employé à la place de "sensibilité".

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.15, modifié — Dans la définition, suppression de "la racine carrée" et ajout de "transformée de Fourier du » avant « tension de sortie en circuit ouvert" et "pression acoustique".]

3.5

niveau de sensibilité de réception en champ libre

L_M

vingt fois le logarithme de base 10 du rapport du module de la sensibilité en champ libre M_f à une valeur de la sensibilité de référence, M_{ref} , en décibels

$$L_M = 20 \log_{10} \frac{|M_f|}{M_{ref}} \text{ dB} \quad (3)$$

Note 1 à l'article: L'unité du **niveau de sensibilité de réception en champ libre** est le décibel, dB. La valeur de la sensibilité de référence, M_{ref} , est $1 \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ou l'un de ses multiples ou sous-multiples SI. La valeur de référence la plus fréquente utilisée en acoustique sous-marine est $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.16, modifié — Dans la définition, ajout de "module" avant "sensibilité en champ libre".]

3.6

directivité isotrope

caractéristique de la réponse d'un **transducteur** telle qu'elle ne varie pas selon la direction dans les limites d'une tolérance spécifiée

Note 1 à l'article: La tolérance est spécifiée.

Note 2 à l'article: La **directivité isotrope** peut être spécifiée dans un espace à deux dimensions dans un seul plan alors que, dans un espace à trois dimensions, un **transducteur** peut être omnidirectionnel en tout plan passant par le centre de référence.

Note 3 à l'article: En règle générale, la réponse directionnelle d'un **transducteur** approche la **directivité isotrope** lorsque les dimensions du **transducteur** sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde acoustique.

3.7

transducteur réciproque

transducteur électroacoustique linéaire, passif et réversible, tel que les coefficients de couplage sont égaux, que la transformation ait lieu dans le sens électrique/mécanique ou inversement

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-25-08, modifiée. Dans la définition, remplacement de "pour les deux sens" par "que la transformation ... ou inversement".]

3.8

transducteur réversible

transducteur pouvant fonctionner comme un **projecteur** ou comme un **hydrophone**

3.9

projecteur

projecteur acoustique sous-marin

transducteur électroacoustique convertissant les **signaux** électriques en son se propageant dans l'eau

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.37; modifié – Le terme "**projecteur** acoustique sous-marin" a été ajouté.]

3.10

réponse à l'émission en courant

S_1

quotient du produit de la transformée de Fourier de la pression acoustique $\mathcal{F}(p(t))$ à un endroit dans le **champ acoustique lointain** d'un **projecteur** (compensé pour la perte d'absorption) et à la distance, d , par rapport au centre de référence du **projecteur**, sur la transformée de Fourier du courant électrique passant par le **projecteur** $\mathcal{F}(I(t))$, à une fréquence spécifique et dans une direction donnée, dans les conditions de champ acoustique libre et dans un milieu uniforme

$$S_1 = \frac{\mathcal{F}(p(t)d)}{\mathcal{F}(I(t))} \exp[jk(d-d_0)] \quad (4)$$

où d_0 est la distance de référence, choisie égale à 1 m

Note 1 à l'article: La **réponse à l'émission en courant** d'un **projecteur** est un paramètre à valeur complexe. Le module de la **réponse à l'émission en courant** est exprimé en unités de pascal mètre par ampère ($\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$)⁻¹. Le déphasage est l'argument de la réponse à l'émission et représente la différence de phase entre la pression acoustique à une distance d par rapport au **projecteur** et le courant électrique. L'unité du déphasage est le radian.

Note 2 à l'article: Le terme "sensibilité" est parfois employé à la place de "réponse".

3.11

niveau de réponse à l'émission en courant

$L_{S,I}$

vingt fois le logarithme de base 10 du rapport du module de la **réponse à l'émission en courant**, S , à une valeur de référence de la réponse à l'émission $S_{I,\text{ref}}$, en décibels

$$L_{S,I} = 20 \log_{10} \frac{|S|}{S_{I,\text{ref}}} \text{ dB} \quad (5)$$

Note 1 à l'article: L'unité du **niveau de réponse à l'émission en courant** est le décibel, dB. La valeur de référence de la réponse à l'émission, $S_{I,\text{ref}}$, est $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Note 2 à l'article: La **réponse à l'émission en courant** d'un **projecteur** est parfois abrégée en "réponse à l'émission en courant" (TCR – *transmitting current response*).

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.27, modifié – Dans la définition, ajout de "module de" avant "**réponse à l'émission en courant**", et l'ajout de "en décibels" à la fin. La formule a été ajoutée. Les Notes à l'article existantes ont été combinées.]

3.12

réponse à l'émission en tension

S_V

quotient du produit de la transformée de Fourier de la pression acoustique $\mathcal{F}(p(t))$ à un endroit dans le **champ acoustique lointain** d'un **projecteur** (compensé pour la perte d'absorption) et à la distance, d , par rapport au centre de référence du **projecteur**, sur la transformée de Fourier de la tension électrique aux bornes du **projecteur** $\mathcal{F}(V(t))$, à une fréquence spécifiée et dans une direction donnée, dans les conditions de champ acoustique libre et dans un milieu uniforme

$$S_V = \frac{\mathcal{F}(p(t))d}{\mathcal{F}(V(t))} \exp[jk(d-d_0)] \quad (6)$$

où d_0 est la distance de référence choisie comme étant égale à 1 m

Note 1 à l'article: La **réponse à l'émission en tension** d'un **projecteur** est un paramètre à valeur complexe. Le module de la **réponse à l'émission en tension** est exprimé en unités de pascal mètre par volt $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$. Le déphasage est l'argument de la réponse à l'émission et représente la différence de phase entre la pression acoustique à une distance d par rapport au **projecteur** et le courant électrique. L'unité du déphasage est le radian.

Note 2 à l'article: Le terme "sensibilité" est parfois employé à la place de "réponse".

Note 3 à l'article: La **réponse à l'émission en tension** d'un **projecteur** est parfois abrégée en "réponse à l'émission en tension" (TVR – *transmitting voltage response*).

3.13

niveau de réponse à l'émission en tension

$L_{S,V}$

vingt fois le logarithme de base 10 du rapport du module de la **réponse à l'émission en tension**, S_V , à une valeur de référence de la réponse à l'émission, S_{ref} , en décibels

$$L_{S,V} = 20 \log_{10} \frac{|S_V|}{S_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (7)$$

Note 1 à l'article: L'unité du **niveau de réponse à l'émission en tension** est le décibel, dB. La valeur de référence de la réponse à l'émission, S_{ref} , est $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.30, modifié – Dans la définition, ajout de "module de" avant "**réponse à l'émission en tension**", et ajout de "en décibels" à la fin. La formule a été ajoutée. Les Notes à l'article existantes ont été combinées.]

3.14

nombre d'onde

k

inverse de la longueur d'onde acoustique, multipliée par 2π

$$k = 2\pi/\lambda \quad (8)$$

Note 1 à l'article: Le **nombre d'onde** est exprimé en unités par m, m^{-1} .

Note 2 à l'article: Dans certaines branches de la physique, le terme **nombre d'onde** peut être considéré comme étant équivalent à $2\pi/\lambda$ ou $1/\lambda$, mais dans le domaine technique de l'acoustique, $2\pi/\lambda$ est préféré. Ce terme est appelé "**nombre d'onde** angulaire" dans l'IEC 60050-103:2009, 103-10-12.

[SOURCE: IEC 60050-726:1982, 726-05-02, modifié – Dans la définition, "de la longueur d'onde dans un guide ou de la longueur d'onde d'une onde plane" a été remplacé par "longueur d'onde acoustique" et "multipliée par 2π " a été ajouté. Les Notes à l'article ont été ajoutées.]

3.15

hydrophone

transducteur électroacoustique qui produit des tensions électriques sous l'effet de **signaux** de pression transmis dans l'eau

Note 1 à l'article: Un **hydrophone** est conçu pour répondre principalement à une pression acoustique sous-marine.

Note 2 à l'article: En général, un **hydrophone** peut également produire un **signal** en réponse à des fluctuations de pression non acoustique (par exemple, celles existant dans la couche limite turbulente en conditions de crue).

Note 3 à l'article: Les types d'**hydrophones** incluent les **hydrophones** de référence et les **hydrophones** de mesures. Les **hydrophones** de mesure sont utilisés pour les mesures générales des champs acoustiques, et les **hydrophones** de référence sont principalement utilisés à des fins d'étalonnage (par exemple, pour les étalonnages par comparaison avec les **hydrophones** de mesure).

Note 4 à l'article: Les **hydrophones** sont principalement utilisés pour les appareils d'écoute, mais pour l'étalonnage par réciprocité, un **hydrophone** est utilisé en tant que transducteur réciproque, jouant non seulement le rôle d'un **hydrophone**, mais également d'un projecteur (source sonore).

Note 5 à l'article: Un **hydrophone** intégré dans un système d'acquisition de données est parfois appelé "**hydrophone** numérique", mais il est préférable de considérer cette combinaison comme un système de mesure, non comme un simple **hydrophone**.

Note 6 à l'article: Si un **hydrophone** est connecté à un amplificateur de charge, la sensibilité de l'**hydrophone** est parfois décrite en termes de sensibilité à la charge, qui est reliée à la sensibilité en tension de l'**hydrophone** par sa capacité électrique.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.17, modifié – Dans la définition, "un signal électrique" a été remplacé par "des tensions électriques".]

3.16

signal

grandeur de champ variable dans le temps spécifiée à l'étude, comme le courant électrique, la tension, la pression acoustique, la vitesse de particules acoustiques ou d'autres grandeurs

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.5.8]

3.17**réponse directionnelle****directivité****modèle de directivité**

variation normalisée de la sensibilité du **transducteur** avec l'angle, en appliquant la sensibilité de réception et d'émission d'un **transducteur électroacoustique**

Note 1 à l'article: La valeur de sensibilité utilisée pour la normalisation est la sensibilité dans une direction de référence spécifiée, le plus souvent la sensibilité dans la direction de l'axe principal du **transducteur** (telle que définie dans l'IEC 60500:2017).

Note 2 à l'article: S'il s'agit d'un **transducteur** réciproque, la **réponse directionnelle** normalisée est la même en mode émission et en mode réception.

Note 3 à l'article: La réponse est parfois appelée niveau de **réponse directionnelle** normalisée, exprimé en décibels.

Note 4 à l'article: La **réponse directionnelle** peut être spécifiée dans un espace à deux dimensions dans un seul plan. Par convention, la **réponse directionnelle** à deux dimensions est spécifiée dans les trois plans définis pour le système de coordonnées du **transducteur** présenté dans l'IEC 60500:2017 (XY, XZ, YZ). Dans les trois dimensions, la **réponse directionnelle** d'un **transducteur** peut être spécifiée dans tous les plans passant par le centre de référence.

3.18**perte de déviation angulaire**

différence entre le niveau de sensibilité du **transducteur** correspondant à l'axe de référence et son niveau de sensibilité pour une direction spécifiée

Note 1 à l'article: La perte est exprimée en tant que niveau (relatif) en décibels.

Note 2 à l'article: La perte de déviation angulaire est identique au niveau de la réponse directionnelle normalisée.

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-25-69]

3.19**facteur de surtension****facteur Q**

Q

mesure de l'acuité de la résonance d'un **transducteur**; le facteur de surtension est égal à 2π fois le rapport de l'énergie maximale emmagasinée à l'énergie dissipée pendant une période

Note 1 à l'article: Le facteur de surtension est en général mesuré comme étant l'inverse de la largeur de bande relative à la résonance (voir Annexe B).

[SOURCE: IEC 60050-801:1994, 801-24-12, modifié – Dans la définition, "d'un système résonant" a été remplacé par "d'un transducteur". Ajout de la Note 1 à l'article.]

4 Symboles et abréviations

D	dimension linéaire la plus grande du transducteur
C	capacité électrique
c	vitesse du son dans l'eau
D_i	indice de directivité
d	distance entre le projecteur et l' hydrophone
dS	élément différentiel de surface sur une sphère
f	fréquence acoustique
f_R	fréquence de résonance (d'un transducteur)
I	courant électrique
I_P	courant électrique à travers un projecteur
I_T	courant électrique à travers un transducteur

j	racine carrée de moins un
K_f	facteur de correction en champ lointain
l	largeur de cuve
L_M	niveau de sensibilité de réception en champ libre
$L_{S,I}$	niveau de réponse à l'émission en courant
$L_{S,V}$	niveau de réponse à l'émission en tension
$\underline{M}_f$	sensibilité de réception en champ libre
$\underline{M}_H$	sensibilité de réception en champ libre de l'hydrophone
$\underline{M}_T$	sensibilité de réception en champ libre du transducteur
$\underline{M}_P$	sensibilité de réception en champ libre du projecteur (si utilisé en tant qu'hydrophone)
$\underline{M}_R$	sensibilité de réception en champ libre de l'hydrophone de référence
p	pression acoustique
p_a	pression acoustique dans la direction de référence pour R_θ pendant les mesurages de la réponse directionnelle
P	projecteur
Q	facteur de surtension du transducteur (ou du système de mesure)
r	plage à partir de la source (distance entre la source et le point dans le champ acoustique)
R	résistance
R_θ	facteur de directivité
S_I	réponse à l'émission en courant
$S_{I,H}$	réponse à l'émission en courant d'un hydrophone (utilisé en tant que projecteur)
$S_{I,P}$	réponse à l'émission en courant d'un projecteur
$S_{I,T}$	réponse à l'émission en courant d'un transducteur
S_V	réponse à l'émission en tension d'un projecteur
U	tension électrique
U_H	tension en circuit ouvert au niveau de l' hydrophone
U_R	tension en circuit ouvert au niveau d'un hydrophone de référence étalonné
U_{PH}	tension en circuit ouvert au niveau d'un hydrophone , à partir d'un projecteur comme source sonore
U_{PH}	tension en circuit ouvert au niveau d'un hydrophone , à partir d'un transducteur comme source sonore
U_{PT}	tension en circuit ouvert au niveau d'un transducteur , à partir d'un projecteur comme source sonore
V_P	tension d'attaque électrique d'émission au niveau du projecteur
V_T	tension électrique d'émission au niveau du transducteur
W	bande passante
$\underline{Z}$	impédance électrique
$\underline{Z}_{PH}$	impédance électrique de transfert du projecteur et de l'hydrophone
$\underline{Z}_{TH}$	impédance électrique de transfert du transducteur et de l'hydrophone
$\underline{Z}_{PT}$	impédance électrique de transfert du transducteur et du projecteur
θ	angle vertical (angle d'élévation)
λ	longueur d'onde du son dans l'eau

ρ	densité de l'eau
τ	durée de l'impulsion
φ	angle d'azimut (plan horizontal)
ω	fréquence angulaire

5 Procédures générales d'étalonnage

5.1 Exigences générales d'étalonnage

5.1.1 Types d'étalonnages

Deux grands types d'étalonnages sont couverts dans le domaine d'application du présent document:

- L'étalonnage absolu sans nécessité d'un **transducteur** de référence acoustique
Dans ce cas, l'étalonnage repose en général sur le principe de réciprocité acoustique, avec la méthode exigeant trois **transducteurs électroacoustiques**, dont l'un au moins doit être un **transducteur réciproque**. Il s'agit d'une méthode d'étalonnage primaire, essentiellement traçable par rapport aux normes électriques primaires et permettant d'atteindre une grande précision.
- L'étalonnage relatif à l'aide d'un **transducteur** de référence acoustique étalonné
Dans ce cas, l'étalonnage est réalisé par comparaison avec un autre **transducteur** acoustique qui a déjà été étalonné. Le **transducteur** de référence peut être un **hydrophone** étalonné ou un **projecteur** étalonné. L'exactitude est en général dégradée comparée à un étalonnage par réciprocité, à cause essentiellement de l'incertitude ajoutée à laquelle contribue le dispositif acoustique de référence.

5.1.2 Exigences du champ acoustique

Pour que les étalonnages soient valides, les exigences générales suivantes doivent être satisfaites [3] [4] [5]:

- conditions de champ acoustique libre, exigeant une influence minimale des réflexions acoustiques provenant des limites du milieu (voir 5.2);
- conditions de **champ acoustique lointain**, exigeant une distance de séparation suffisante entre la source et le récepteur (voir 5.3);
- conditions en régime permanent acoustique, exigeant un comportement transitoire affiché par les **transducteurs** résonants comme ayant disparu (voir 5.4).

5.2 Exigences du champ acoustique libre

5.2.1 Signaux continus

Avec des **signaux** continus, pour limiter les fluctuations de l'amplitude du **signal** en raison des interférences provenant des réflexions limites, la distance minimale entre les **transducteurs** et la limite du milieu la plus proche doit être telle que l'amplitude des **signaux** réfléchis ne soit pas supérieure à 3 % de l'amplitude du **signal** direct.

NOTE 1 Pour une configuration de mesure donnée, la distance minimale par rapport aux limites permettant de satisfaire à l'exigence ci-dessus dépend de la **directivité** des **transducteurs**, du coefficient de réflexion des surfaces délimitantes et de la fréquence du **signal** (aux fréquences acoustiques élevées, l'absorption dans l'eau augmente la perte de propagation et réduit la distance minimale nécessaire). Ces facteurs peuvent faire l'objet d'une évaluation individuelle avant de choisir la distance minimale par rapport aux limites afin de satisfaire aux exigences en matière de **signaux** continus. Souvent, la surface de l'eau est la limite la plus proche. Par exemple, pour deux **transducteurs** omnidirectionnels placés à 5 m l'un de l'autre, pour que l'amplitude des réflexions soit dans les limites de l'exigence ci-dessus, les **transducteurs** sont placés à une profondeur d'environ 16 m (en prenant pour hypothèse que la réflexion acoustique totale se produit à la surface de l'eau et que la fréquence acoustique est suffisamment basse pour que l'absorption ne soit pas significative) [4], [5].

NOTE 2 Un autre moyen d'obtenir des conditions de champ acoustique libre pour les **signaux** continus consiste à utiliser un revêtement acoustique anéchoïque déployé sur la surface intérieure d'une cuve d'essai. Dans ce cas, les performances du matériau anéchoïque (en ce qui concerne l'affaiblissement de réflexion en fonction de l'angle) peuvent être suffisantes pour satisfaire à l'exigence ci-dessus pour l'amplitude du **signal** réfléchi au niveau de l'**hydrophone** sur la plage de fréquences à l'étude. Noter que la surface de l'eau réfléchit énormément le son et qu'une cuve d'essai totalement anéchoïque exige de placer le matériau anéchoïque juste au-dessous de la surface de l'eau, en complément du revêtement des parois et du fond de la cuve [4].

NOTE 3 Certaines méthodes d'étalonnage utilisant des cuves d'eau réverbérées utilisent des **signaux** continus (ou au moins des **signaux** qui sont bien plus longs que le temps sans écho de la cuve). Dans ce type de méthodes, les conditions de pseudo champ libre peuvent être obtenues par des techniques de traitement du **signal** qui compensent les effets des réflexions des limites de la cuve. Voir Annexe J pour des exemples de ce type de méthodes.

5.2.2 Signaux limités dans le temps

Si des **signaux** limités dans le temps sont utilisés, comme des impulsions ou des salves à une seule fréquence (**signaux** à salves d'impulsions), les réflexions doivent être éliminées en choisissant la distance minimale entre les **transducteurs** et chaque surface délimitante (surface de l'eau, fond et parois de la cuve) de sorte que le délai des **signaux** réfléchis par rapport au **signal** direct soit supérieur à la durée du **signal** direct.

NOTE Des **signaux** en salves ou impulsionnels peuvent être utilisés dans des cuves d'essai de dimensions finies pour éliminer les réflexions à l'aide de **signaux** de durée finie et des fenêtres de temps adaptées. De cette manière, les **signaux** réfléchis arrivent bien après les **signaux** directs, le **signal** sans écho étant suffisant pour procéder à l'analyse exigée. Dans ce cas, il existe une fréquence limite inférieure en dessous de laquelle le **signal** en régime permanent ne peut pas être mesuré par des moyens conventionnels. Voir l'Annexe E pour une description détaillée de l'utilisation des **signaux** impulsionnels et en salves dans l'étalonnage [4] [5] [6].

5.3 Exigences du champ acoustique lointain

La distance d entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être suffisamment importante pour que les conditions de **champ acoustique lointain** soient respectées et que les erreurs dues à la dimension finie des **transducteurs** soient réduites le plus possible. À cet effet, la séparation **projecteur-hydrophone** doit être plus importante que la dimension du plus grand **transducteur**, et l'**hydrophone** doit être placé dans le **champ acoustique lointain** de la source.

Pour les deux **transducteurs** dont les dimensions maximales des surfaces sensibles sont D_1 et D_2 respectivement, la distance de séparation minimale, d , doit être choisie d'après les relations suivantes:

$$d > K_f \left(\frac{D_1^2}{\lambda} + \frac{D_2^2}{\lambda} \right) \quad (9)$$

et simultanément:

$$d > 5D_1 \text{ et } d > 5D_2 \quad (10)$$

où K_f est le facteur de correction en champ lointain choisi pour vérifier que le champ acoustique approche la répartition sphérique selon une tolérance spécifiée.

Pour obtenir une séparation qui réduit l'erreur provoquée par un défaut de répartition sphérique à moins de 0,2 dB, la valeur de K_f dans la Formule (9) doit être choisie supérieure à 1,3.

Voir Annexe D pour de plus amples informations sur les critères ci-dessus.

NOTE Lors du mesurage de la **réponse directionnelle** d'un **transducteur**, la distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** est choisie plus grande que celle indiquée par les Formules (9) et (10). La distance est inférieure à deux fois celle donnée par la Formule (9) ou la Formule (10), selon celle qui est la plus grande. Voir Annexe D et les références [3] à [9].

5.4 Exigences relatives aux conditions en régime établi

Si des **signaux** à salves d'impulsions sont utilisés dans l'étalonnage, la fenêtre de temps utilisée pour sélectionner le **signal** pour l'analyse doit être placée de sorte que le début de la fenêtre se trouve à un délai d'au moins Q périodes de la fréquence de résonance du **projecteur** après l'arrivée du **signal** direct, où Q représente le facteur de surtension (facteur Q) de la résonance principale du **projecteur**.

L'exigence de 5.4 s'applique uniquement pour les signaux limités dans le temps. Si des signaux continus sont utilisés, les transducteurs sont considérés comme ayant atteint les conditions de régime permanent.

NOTE 1 Dans la disposition conventionnelle des **signaux** à salves d'impulsions utilisés pour les étalonnages dans les cuves d'essai, les mesurages sont réalisés sur la partie en régime permanent du **signal** reçu, avec des techniques de portillonnage temporel utilisées pour isoler le **signal** propagé direct des réflexions provenant des limites de la cuve et de la surface de l'eau. Dans ce type de mesurages, le **signal** en régime permanent est limité dans le temps par l'arrivée de réflexions limites et par des transitoires de démarrage provoqués par le comportement résonant des **transducteurs** en essai. Pour un simple **hydrophone** de mesure, le facteur Q est en général de l'ordre de 3 ou 4 avec une fréquence de résonance relativement élevée, donnant lieu à de courts transitoires de démarrage qui imposent peu de restriction sur la durée du **signal** disponible pour le mesurage. Toutefois, les **transducteurs** utilisés en tant que **projecteurs** peuvent présenter un facteur Q plus élevé, ce qui réduit le **signal** disponible (en particulier si la fréquence de résonance est faible [4] [5] [6], [10]).

NOTE 2 Si le **signal** de tension généré par l'**hydrophone** n'atteint pas les conditions de régime permanent pendant le temps sans écho disponible, le régime permanent ne peut pas être observé directement. Cela signifie que pour une dimension de cuve et un facteur Q de **transducteur** donnés, il existe une fréquence limite inférieure en dessous de laquelle les étalonnages ne peuvent pas être réalisés à l'aide des **signaux** à salves d'impulsions par des moyens conventionnels. Voir Annexe E pour plus de recommandations relatives aux conditions de régime permanent.

NOTE 3 Si un filtrage à bande étroite est appliqué aux **signaux** (probablement pour augmenter le rapport **signal** sur bruit en présence de bruit à large bande), le transitoire qui apparaît au début de la salve d'impulsion est modifié. Même si ce type de filtrages peut éliminer les transitoires provoqués par des résonances de **transducteur** à fréquence plus élevée, il peut également retarder l'apparition du régime permanent et réduire la durée du **signal** disponible pour l'analyse. C'est la raison pour laquelle les bandes passantes de filtres inférieures à une octave sont rarement utilisées pour l'étalonnage avec signaux à salves d'impulsions.

NOTE 4 Les paramètres de **signal** exigés peuvent également être déterminés par des techniques de traitement des **signaux** plus avancées. Il est alors possible d'estimer l'amplitude et la phase du **signal** en régime permanent sans respecter une période complète de régime permanent. Cela implique d'utiliser des méthodes de modélisation de **signal** et de prédiction de **signal** qui utilisent la partie transitoire du **signal** pour prédire l'amplitude et la phase en régime permanent, et également d'utiliser les salves d'impulsions complétées en quadrature (voir Annexe E et Annexe J pour de plus amples informations).

5.5 Exigences relatives au matériel

5.5.1 Installation d'étalonnage

L'installation d'étalonnage utilisée doit permettre de satisfaire aux exigences acoustiques décrites en 5.2, 5.3 et 5.4 sur la plage souhaitée de fréquences acoustiques et pour les types d'**hydrophones** et de **transducteurs** en essai.

L'installation d'étalonnage doit permettre de placer de manière reproductible au moins deux **transducteurs** en même temps à une distance de séparation connue et de les aligner pour l'étalonnage selon les exigences de 5.6.

NOTE 1 Le type d'installations d'étalonnage le plus souvent rencontré est une cuve d'essai en béton, en acier ou en bois remplie d'eau (donnant lieu à la cuve réverbérée due aux limites de réflexion). Les **signaux** limités dans le temps (les salves d'impulsions, par exemple) sont utilisés avec le portillonnage temporel pour éliminer les réflexions. Ce type d'installations assure un accès pratique, un positionnement précis des dispositifs (à l'aide d'un cadre support rigide ou d'un système de positionnement) et un contrôle des conditions d'environnement. Toutefois, la dimension finie limite la plage de fréquences et le type de **transducteurs** à étalonner. Les essais d'un **projecteur** à large ouverture à des fréquences élevées (un **transducteur** « à valeur de ka élevée ») peuvent s'avérer difficiles dans une petite cuve d'essai, car des conditions de **champ acoustique lointain** ne peuvent pas toujours être obtenues (voir 5.3). Une petite cuve d'essai limite également le temps sans écho, de sorte que le **signal** en régime permanent ne peut pas toujours être observé pour des **transducteurs** dont le facteur Q est élevé (voir 5.4). Voir Annexe E pour d'autres recommandations et références [3] à [6], [10].

NOTE 2 Si la cuve d'essai est revêtue d'un matériau anéchoïque, les conditions de champ libre exigées par 5.2 peuvent être obtenues dans une cuve d'essai plus petite, en fonction des performances validées du matériau anéchoïque (voir 5.2.1). Toutefois, le déploiement des **transducteurs** dans la cuve peut présenter d'autres difficultés pratiques si la surface de l'eau est recouverte du matériau anéchoïque [4].

NOTE 3 Pour les installations en eau libre, les **transducteurs** sont en général déployés à partir de la surface à l'aide d'une structure flottante (un radeau pneumatique ou un ponton, par exemple). Les **transducteurs** sont en général déployés à une plus grande profondeur que les cuves, mais la précision du positionnement et de l'alignement peut être dégradée comparée aux cuves d'essai. Le manque de contrôle des conditions d'environnement peut engendrer des problèmes supplémentaires liés: (i) aux variations de la température de l'eau (diurnes et saisonnières) provoquant une variation des performances du **transducteur** et introduisant des thermoclines; (ii) à la météo (action du vent et des vagues) provoquant le mouvement relatif des **transducteurs**; et (iii) au bruit acoustique provenant de sources naturelles et d'autres activités humaines aux alentours [4].

5.5.2 Instruments

5.5.2.1 Généralités

Les instruments de mesure suivants sont exigés pour procéder à l'étalonnage d'un **transducteur électroacoustique** sous-marin. Tous doivent présenter des performances qui couvrent la plage de fréquences acoustiques souhaitée pour les étalonnages (200 Hz à 1 MHz au maximum, mais elle peut être plus étroite en fonction de l'application) [4], [6], [10].

5.5.2.2 Source du signal

Elle doit être utilisée pour fournir le **signal** électrique aux **projecteurs** d'entraînement. Elle peut également être utilisée pour fournir le déclencheur permettant de synchroniser l'acquisition du **signal** par le numériseur.

NOTE En règle générale, la source du **signal** fournit une sortie maximale de seulement quelques volts, mais offre une plage de types de **signaux**, y compris les impulsions à déclenchement périodique d'une seule fréquence.

5.5.2.3 Amplificateur de puissance

Il est exigé pour alimenter le **transducteur** utilisé comme un **projecteur** avec une puissance électrique suffisante pour générer des pressions acoustiques au niveau de l'**hydrophone** au moins 6 dB supérieures au bruit ambiant dans l'installation.

NOTE 1 En règle générale, un amplificateur de puissance capable de générer une puissance de sortie de 100 W est suffisant pour les besoins d'étalonnage de la plupart des **hydrophones** et des **transducteurs**, mais des performances de puissance plus élevée peuvent parfois être exigées pour des applications spécialisées.

NOTE 2 En règle générale, l'amplificateur de puissance présente une faible impédance de sortie électrique (mais peut par ailleurs présenter une impédance électrique de sortie correspondant à celle du **transducteur** pour une puissance de sortie maximale).

5.5.2.4 Préamplificateur d'hydrophone

Il doit être exigé pour amplifier la tension électrique développée par l'**hydrophone**, et doit, dans l'idéal, présenter une impédance d'entrée électrique supérieure à celle de l'**hydrophone** selon un facteur d'au moins 100 (étant donné que l'impédance électrique d'un **hydrophone** piézoélectrique est la plupart du temps capacitive, la valeur de la capacité d'entrée du préamplificateur doit être suffisamment faible).

NOTE 1 En règle générale, le préamplificateur présente un gain de tension et un filtrage électronique sélectionnables (par ailleurs, le filtrage peut être assuré à l'aide d'une unité dédiée séparée ou peut être obtenu de façon numérique dans le post-traitement).

NOTE 2 Un préamplificateur d'**hydrophone** séparé n'est pas nécessaire si un **hydrophone** est utilisé avec un préamplificateur intégral intégré.

5.5.2.5 Instrument de mesure du courant

Il est exigé si le courant électrique d'attaque qui traverse le **projecteur** est mesuré (lors d'un étalonnage par réciprocité en champ libre, par exemple). De préférence, il convient qu'il soit composé d'un transformateur de courant étalonné qui fournit une tension de sortie

proportionnelle au courant électrique (avec la tension, puis mesurée par le numériseur avec la tension de l'**hydrophone**).

NOTE En variante, une résistance et un voltmètre étalonnés peuvent être utilisés.

5.5.2.6 Instrument de mesure de la tension d'attaque

Il est exigé si la tension d'attaque électrique vers le **projecteur** est mesurée, par exemple, lors de la détermination de la **réponse à l'émission en tension** (TVR).

NOTE Il est en général composé d'une sonde de tension à impédance élevée ou d'un atténuateur étalonné visant à réduire la tension d'attaque jusqu'à 40 dB, de manière à pouvoir être mesurée par le numériseur.

5.5.2.7 Numériseur

Le numériseur utilisé doit être un convertisseur analogique/numérique (CAN) ou un oscilloscope de numérisation, qui capture une forme d'onde numérique en enregistrant les **signaux** électriques pendant l'étalonnage (tension de l'**hydrophone**, tension provenant du transformateur de courant, etc.).

La fréquence d'échantillonnage du numériseur doit être égale à au moins deux fois et demie la fréquence maximale à l'étude, et la résolution doit être suffisante pour un enregistrement précis du **signal** sans erreur de quantification, avec une résolution minimale recommandée de 8 bits. Il est recommandé de pouvoir déclencher le numériseur en externe (en règle générale par la source du **signal** ou l'ordinateur). Si des mesurages électriques absolus sont réalisés, le numériseur doit être étalonné sur la plage de fonctionnement.

L'exigence de représentation sans équivoque des **signaux** dans les limites de la plage de fréquences souhaitée exige une fréquence d'échantillonnage du CAN supérieure à la fréquence de Nyquist du signal entré dans le CAN.

NOTE 1 Des numériseurs et des oscilloscopes de numérisation présentant les fréquences d'échantillonnage exigées sont aisément disponibles avec des résolutions comprises entre 8 bits et 16 bits. Plus la résolution est élevée, plus le mesurage des **signaux** est bon, avec une probabilité d'erreurs moins importante en raison de la distorsion de quantification.

NOTE 2 Pour offrir une fonction anticrênelage, un filtre passe-bas peut être utilisé, lequel est conçu pour limiter le contenu en fréquence du signal avant la numérisation sous la fréquence de Nyquist du système d'acquisition.

5.5.2.8 Régulateur informatique

Il est recommandé que l'étalonnage soit contrôlé par un ordinateur sur lequel est installé le logiciel d'acquisition approprié qui contrôle le numériseur et l'acquisition du **signal** (et peut également fournir le déclencheur pour la source du **signal**).

NOTE 1 Le logiciel est souvent utilisé pour procéder à l'analyse exigée du **signal**, y compris à la détermination de la fenêtre de temps et au calcul de l'amplitude des **signaux** enregistrés. Toutefois, certaines de ces fonctions peuvent être réalisées à l'aide des fonctions de traitement embarquées disponibles sur un oscilloscope de numérisation.

NOTE 2 Même si certaines des tâches de mesure ci-dessus peuvent être réalisées manuellement (à l'aide d'un oscilloscope analogique, par exemple), cette pratique est aujourd'hui déconseillée.

5.5.2.9 Transducteurs électroacoustiques

Un certain nombre de **transducteurs** doivent être utilisés comme **projecteurs** et **hydrophones** lors des étalonnages. Par exemple, l'étalonnage en champ libre par réciprocité à trois **transducteurs** exige au moins deux **transducteurs** en plus du dispositif en essai (voir l'Article 8), et l'étalonnage relatif à l'aide d'un **hydrophone** ou d'un **projecteur** étalonné exige des **transducteurs** de référence étalonnés et éventuellement des **projecteurs** auxiliaires permettant de générer un champ acoustique approprié (voir l'Article 9).

NOTE Il est possible qu'un certain nombre de **transducteurs** différents soient exigés pour couvrir une large plage de fréquences (cela étant particulièrement vrai pour les **projecteurs** dont la plage de fréquences peut être limitée en raison de leur comportement résonant inhérent).

5.6 Positionnement et alignement

5.6.1 Système de coordonnées

Le système de coordonnées angulaires choisi doit être celui spécifié par l'IEC 60500:2017.

5.6.2 Direction de référence

Avant l'étalonnage, une direction de référence doit être définie pour chaque **hydrophone** et **projecteur**. Sauf s'il y a de bonnes raisons de faire autrement, la direction de référence doit être choisie de manière à coïncider avec l'axe principal de l'**hydrophone** ou du **projecteur** [tel que défini dans l'IEC 60500:2017].

Pour les **hydrophones** omnidirectionnels de construction symétrique, la direction de référence doit être dans un plan orthogonal à l'axe du corps de l'**hydrophone** et doit être indiquée par une marque sur le corps de l'**hydrophone** [10].

NOTE 1 La direction de référence est la direction pour laquelle l'étalonnage en champ libre est valide. Pour les **transducteurs** directionnels, la direction de référence est en général choisie de manière à coïncider avec l'axe principal du **transducteur**.

NOTE 2 La direction peut également être choisie en déterminant l'angle de la réponse maximale du **transducteur** à une fréquence établie en mesurant une **réponse directionnelle** (voir Annexe A pour une description).

5.6.3 Montage et support du transducteur

Chaque **projecteur** et **hydrophone** doit être solidement fixé à un support permettant de placer les dispositifs de manière précise et reproductible en des points fixes dans l'eau.

Le montage de support d'un **hydrophone** doit être choisi de manière à avoir le moins d'impact possible sur la sensibilité mesurée, pour autant que l'exigence ci-dessus soit satisfaite quant au positionnement précis des **transducteurs**.

Si une platine rotative est intégrée dans le cadre du support ou le système de positionnement, le montage doit permettre de positionner un **transducteur** en plaçant son centre de référence le long de l'axe de rotation.

Si le montage semble avoir un impact sur la sensibilité mesurée, le **transducteur** doit être étalonné dans le même montage utilisé lors du déploiement du dispositif pour les mesurages réalisés sur le terrain. Si le dispositif est considéré comme sensible au type de support/montage, une description du dispositif de montage doit être mentionnée avec les résultats.

Certains **transducteurs** sont plus sensibles que d'autres à l'influence de la méthode de montage. Pour éviter l'influence du montage, il est recommandé d'éviter les supports remplis d'air ou les mâts. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'utiliser des supports à irrigation par ruissellement naturel tels que les mâts creux en fibre de carbone ou en plastique. Toutefois, noter qu'un certain degré de rigidité est exigé pour le montage pour un positionnement et un alignement précis [10].

Pour certains **transducteurs** directionnels, un support à angle droit est exigé pour orienter correctement le **transducteur** dans l'eau, afin d'aligner l'axe principal avec celui de l'autre **transducteur**. Si le **transducteur** est lourd, un contrepoids est exigé afin d'éviter que le support ne s'incline et n'écarte l'axe principal de l'orientation horizontale souhaitée. Noter que si un support à angle droit est utilisé, le centre de référence du **transducteur** doit se situer le long de l'axe de rotation d'une platine rotative intégrée dans le cadre du support ou le système de positionnement [4], [10].

Veiller à réduire le plus possible la quantité de bruit transmis par la structure et pouvant être recueilli par le montage et le cadre de support, puis transmis aux **transducteurs**.

5.6.4 Alignement

Avant chaque mesurage acoustique lors de l'étalonnage, le couple de **transducteurs** concerné (un **projecteur** et un **hydrophone**, par exemple) doit être positionné à la même profondeur d'eau et être orienté de manière à aligner les directions de référence des **transducteurs**. [4], [10]

NOTE 1 Cet alignement peut être réalisé mécaniquement à l'aide de mâts de montage ou d'un assemblage particuliers, ou à l'aide d'un système de positionnement automatisé (composé, par exemple, de moteurs pas-à-pas et de régulateurs). Si les **transducteurs** sont de petits **hydrophones** omnidirectionnels dont la sensibilité varie peu en fonction de l'angle, un alignement mécanique est plus généralement utilisé qu'un alignement acoustique. Noter que les longueurs des mâts de montage par rapport aux éléments actifs de l'**hydrophone** sont soigneusement mesurées de manière à pouvoir être immergés précisément à la même profondeur.

NOTE 2 Les **transducteurs** qui présentent une **directivité** significative autour de leur axe principal peuvent être alignés acoustiquement en recherchant le **signal** reçu maximal à une fréquence spécifique. La direction de référence est parfois choisie selon un angle du diagramme de **réponse directionnelle** dans laquelle la réponse ne varie pas de façon significative avec l'angle directionnel, pour une fréquence spécifique. Noter que si une direction de référence est choisie de cette manière, la même direction est alors choisie pour toutes les fréquences.

NOTE 3 Pour l'alignement acoustique entre deux **transducteurs** (en recherchant le **signal** reçu maximal à une fréquence donnée), au moins deux degrés de liberté sont exigés pour chaque montage de **transducteur**: déplacement vertical dans l'eau pour pouvoir modifier la profondeur du **transducteur**, et la rotation autour de l'axe vertical qui passe par le centre de référence du **transducteur** à l'aide d'une platine rotative intégrée dans le cadre du support ou le système de positionnement.

5.6.5 Distance de séparation

Le montage et le cadre du support doivent permettre de déployer le **projecteur** et l'**hydrophone** dans l'eau selon une distance de séparation connue, dont l'incertitude maximale est de 2 %.

Si le corps de l'**hydrophone** est volumineux comparé à l'élément actif, il est recommandé d'étalonner l'**hydrophone** à la plus grande séparation possible dans l'installation (de sorte que le champ incident donne une approximation aussi proche que possible de l'onde plane). De plus, il est recommandé de consigner la séparation avec les résultats d'étalonnage.

NOTE 1 La distance de séparation peut être mesurée mécaniquement de plusieurs façons. Un cadre de support rigide peut être étalonné de sorte que les mâts de montage du **transducteur** soient suspendus à partir de positions fixes sur le cadre au-dessus de la cuve, selon des séparations connues entre les positions prédéfinies (en prenant pour hypothèse que les **transducteurs** sont suspendus à la verticale). Si un système de positionnement automatisé est utilisé et qu'il a été étalonné, la séparation du **transducteur** peut être établie par rapport aux affichages des régulateurs. Noter qu'il est parfois nécessaire de procéder à des ajustements pour tenir compte des légers décalages introduits lors du montage des **transducteurs**.

NOTE 2 La distance de séparation peut être calculée à partir du temps de propagation acoustique entre le déclencheur du **signal** et l'arrivée du **signal** direct au niveau de l'**hydrophone**. Il s'agit dans ce cas de connaître la vitesse du son qui peut être calculée à l'aide des formules indiquées dans les documents scientifiques de référence, et de connaître la température, la profondeur et la salinité de l'eau [11] à [14]. Noter qu'un **transducteur** commence à répondre à l'onde sonore dès qu'elle atteint l'élément actif et, par conséquent, pour un dispositif sphérique ou cylindrique volumineux, une petite correction doit parfois être apportée à la distance de séparation déduite de manière acoustique afin d'obtenir la séparation des centres de référence du **transducteur** (pour tenir compte du rayon de chaque dispositif, par exemple).

NOTE 3 Si le corps de l'**hydrophone** est volumineux comparé à l'élément actif, le son dispersé incident sur le corps peut gêner l'onde sonore qui arrive directement au niveau de l'élément et provoquer de petites fluctuations dans la réponse en fréquence. Pour des distances de séparation plus petites, ces fluctuations peuvent varier en fonction de la séparation **projecteur-hydrophone** en raison de petites variations des différences de chemin acoustique au fur et à mesure de la variation de la distance de séparation [15], [16].

5.7 Représentation de la réponse en fréquence

Un nombre suffisant de fréquences acoustiques doit être choisi afin de vérifier que les performances du **transducteur** sont bien caractérisées sur la plage de fréquences souhaitée.

Pour les **hydrophones**, sur la plage de fréquences basses dans laquelle la sensibilité est relativement invariable selon la fréquence, la résolution minimale recommandée pour les fréquences acoustiques correspond à un espacement d'un tiers d'octave.

Pour les **projecteurs**, et pour les **hydrophones** proches de la fréquence de résonance, la sensibilité varie de manière plus importante avec la fréquence, et la résolution minimale recommandée pour les fréquences acoustiques correspond à un espacement d'un douzième d'octave.

5.8 Limites de fréquence

5.8.1 Limite de haute fréquence

Les méthodes d'étalonnage décrites ici peuvent être utilisées pour les fréquences jusqu'à 1 MHz, mais les incertitudes peuvent être supérieures à des fréquences de centaines de kilohertz. Les limites de la méthode aux hautes fréquences doivent être prises en considération, et l'influence de toutes les limites doit être reflétée dans l'évaluation de l'incertitude globale (voir Annexe E).

NOTE 1 La distance de séparation minimale exigée permettant à des conditions de **champ acoustique lointain** adaptées d'exister pour un couple spécifique de **transducteurs** augmente avec la fréquence (voir 5.3). À des fréquences suffisamment élevées, la distance exigée pour obtenir des conditions de **champ acoustique lointain** peut dépasser les dimensions de la cuve. De même, si des **signaux** à salves d'impulsions sont utilisés, une augmentation de la distance de séparation du **transducteur** a tendance à réduire le temps sans écho disponible, car les **transducteurs** sont plus proches des limites de la cuve, ce qui complique les mesurages.

NOTE 2 L'affaiblissement du son dû à l'absorption dans l'eau augmente rapidement avec la fréquence, atteignant environ 0,25 dB/m à 1 MHz pour de l'eau douce (à 16 °C) et environ 0,4 dB/m pour l'eau de mer (à 8 °C, à 5 m de profondeur, avec un pH de 8 et une salinité de 35 parties par millier). Cela augmente la perte de propagation à très hautes fréquences, provoquant la faiblesse du rapport **signal** sur bruit disponible pour de grandes distances de séparation. Si des fréquences acoustiques très élevées sont utilisées dans l'étalonnage, des corrections sont nécessaires pour la perte de propagation due à l'absorption acoustique par l'eau. L'affaiblissement du son dû à l'absorption dans l'eau sur les distances de séparation en général utilisé dans l'étalonnage est relativement faible. La correction est inférieure à 0,05 dB et peut être négligée pour des distances de séparation de l'ordre de quelques mètres et des fréquences acoustiques inférieures à 500 kHz dans l'eau douce et inférieures à 300 kHz dans l'eau de mer. Des informations relatives à l'absorption du son dans l'eau, et sa dépendance à la température, à la profondeur, au pH et à la salinité, sont disponibles dans les documents scientifiques de référence (voir Annexe E et les références [17] à [22]).

NOTE 3 La limite de haute fréquence est régie par un certain nombre de facteurs. Ils sont décrits en détail à l'Annexe E.

NOTE 4 A des fréquences supérieures à 0,5 MHz, les principales méthodes d'étalonnage alternatives décrites dans l'IEC 62127-2 [2] et à l'Annexe I peuvent être utilisées.

5.8.2 Limite de basse fréquence

Les limites de la méthode d'étalonnage à des fréquences basses doivent être prises en considération, et l'influence de toutes les limites doit être reflétée dans l'évaluation de l'incertitude globale.

NOTE 1 L'une des principales limites lors de l'utilisation de **signaux** à salves d'impulsions dans des cuves d'essai de dimensions finies est que le petit nombre de cycles de **signaux** en régime permanent disponibles pour le mesurage dépend du facteur de surtension des **transducteurs** et du temps sans écho de la cuve d'essai (qui, successivement, dépend de la dimension de la cuve et de la séparation des **transducteurs**). La fréquence étant abaissée, le nombre de cycles dans la fenêtre de temps disponible est réduit jusqu'à ce que l'amplitude du **signal** en régime permanent ne puisse finalement plus être déterminée par des moyens conventionnels. Cela fournit une fréquence limite inférieure sur les mesurages effectués à l'aide de **signaux** à salves d'impulsions. Pour la plupart des grandes cuves d'essai ayant une dimension minimale de 5 m, la limite de basse fréquence pour l'étalonnage des **hydrophones** est en pratique de l'ordre de 1 kHz selon le facteur Q du **transducteur** source qui régit la pente et l'acuité de la résonance de la réponse à l'émission. Les facteurs qui régissent la basse fréquence des étalonnages sont décrits en détail à l'Annexe E.

NOTE 2 De plus, le niveau de pression acoustique produit par le **projecteur** est réduit à mesure que la fréquence diminue, chutant finalement à une valeur inférieure à 6 dB au-dessus du niveau de bruit ambiant, limitant ainsi la fréquence minimale pour les étalonnages.

NOTE 3 Pour les **signaux** continus dans les cuves anéchoïques, les performances du revêtement anéchoïque peuvent se dégrader aux basses fréquences, ce qui limite la possibilité d'obtenir des conditions en champ libre.

NOTE 4 La limite de basse fréquence pour l'étalonnage en champ libre dans les cuves réverbérées peut être étendue à l'aide de techniques de traitement de **signaux** sophistiquées. Avec certaines de ces techniques, il n'est pas nécessaire d'avoir une période de **signal** complète pour estimer l'amplitude et la phase. Voir l'Annexe E et l'Annexe J pour de plus amples informations.

5.9 Contrôles des interférences acoustiques

Avec les **signaux** à salves d'impulsions, une fréquence de répétition à salves d'impulsions doit être choisie et doit être suffisamment faible pour que toute réverbération dans la cuve disparaisse avant la transmission de la prochaine impulsion.

Le niveau d'interférence par rapport aux **signaux** acoustiques réfléchis doit être au moins inférieur de 30 dB au niveau du **signal**.

NOTE 1 D'autres informations relatives à l'influence des réflexions sont données à l'Annexe E.

NOTE 2 Lorsque des ondulations périodiques lisses peuvent être observées sur un tracé de l'**impédance électrique de transfert** (ou de la sensibilité) en fonction de la fréquence, il s'agit d'une indication selon laquelle des réflexions acoustiques sont susceptibles d'être présentes, entraînant des effets d'interférence constructifs et destructifs. Si l'intervalle de fréquence entre des crêtes successives dans le tracé est Δf et c est la vitesse du son dans le milieu, la différence de trajet Δd entre les **signaux** directs et réfléchis arrivant au niveau de l'**hydrophone**, peut être calculée par $\Delta d = c/\Delta f$ [1].

NOTE 3 Les oscillations provoquées par un **signal** acoustique réfléchi avec une différence de trajet Δd peuvent être éliminées par un calcul complexe de la moyenne mobile de la dépendance à la fréquence de l'impédance de transfert dans l'intervalle de fréquence Δf . Les méthodes d'étalonnage en champ libre dans les champs acoustiques réverbérés des **signaux** avec une puissance répartie dans la bande de fréquences reposent sur cette approche. Voir l'Annexe J pour de plus amples informations.

6 Mesurages électriques

6.1 Forme du signal

Le **signal** électrique par défaut utilisé lors de l'étalonnage est à ondes entretenues (sinusoïdal) ou à salves d'impulsions (ondes sinusoïdales déclenchées).

Quelle que soit la forme du **signal** choisie, les exigences de 5.2, 5.3 et 5.4 s'appliquent toujours. Noter que les exigences relatives à l'obtention d'un champ acoustique libre varient en fonction de la forme du **signal** utilisée (voir 5.2).

NOTE D'autres formes de **signal** sont possibles (les courtes impulsions à large bande ou les porteuses pulsées à fréquence glissante modulées en fréquence, par exemple). Les techniques d'analyse de ce type de **signaux** exigent une analyse spectrale visant à déterminer l'amplitude (et la phase) du **signal** en fonction de la fréquence. Si le **signal** est analysé par une transformée de Fourier, la résolution en fréquence (spécifiée en 5.7) dépend de la longueur d'enregistrement du **signal**.

6.2 Mise à la terre électrique

Afin d'éviter les boucles de terre, les bornes électriques des **transducteurs** ne doivent pas être en contact avec l'eau. Les parties métalliques exposées d'un **hydrophone** doivent être les seules connexions à la terre pour l'écran du câble de l'**hydrophone** et pour le boîtier de l'amplificateur de l'**hydrophone**. Tous les autres contacts à la terre doivent être exclus.

6.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone

6.3.1 Généralités

La tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** doit être mesurée à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**. Les bornes électriques choisies doivent être spécifiées (voir l'IEC 60500:2017, 3.7).

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, la forme d'onde en tension de l'**hydrophone** doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Pour un **signal** à ondes entretenues, le mesurage doit être effectué à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée, d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure absolue, ces éléments doivent être étalonnés. Toutefois, un étalonnage est inutile si le même canal de mesure est utilisé pour mesurer le rapport des tensions, même si, dans ce cas, la linéarité de ce canal doit toujours être déterminée. Lors du mesurage des rapports des tensions, les deux tensions doivent être exprimées dans la même métrique (par exemple, tensions crêtes ou tensions efficaces).

6.3.2 Analyse du signal

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, l'amplitude du **signal** (et, si cela est exigé, la phase du **signal**) doit être déterminée à partir de la forme d'onde en tension de l'**hydrophone** à fenêtre de temps, la fenêtre de temps étant placée sur la partie en régime permanent du **signal** sans écho. Le début de la fenêtre de temps doit être placé sur la forme d'onde après la disparition des transitoires de démarrage du **projecteur**, et la fin de la fenêtre doit être placée avant l'arrivée du premier **signal** réfléchi ou avant la fin du **signal** direct (selon celui qui se produit en premier). Voir l'Annexe E pour de plus amples recommandations relatives au mesurage de l'amplitude et de la phase des **signaux** en régime permanent à fenêtre de temps.

6.3.3 Charge électrique par les appareils de mesure

Au cours des mesurages, l'**hydrophone** doit être connecté à un appareil de mesure à impédance d'entrée électrique élevée (préamplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur), de sorte que l'impédance d'entrée électrique soit bien supérieure à l'impédance électrique de l'**hydrophone** (idéalement, plus de 100 fois supérieure).

Lors de la mesure de l'angle de phase de la tension de sortie de l'**hydrophone**, il convient que l'impédance d'entrée électrique de l'appareil de mesure soit dans l'idéal égale à plus de 1 000 fois l'impédance électrique de l'**hydrophone**.

Lorsque l'impédance électrique de l'**hydrophone** est élevée (par exemple, pour un **hydrophone** piézoélectrique de petites dimensions et de faible capacité), il faut prendre en considération la charge électrique de l'**hydrophone** par l'appareil de mesure. Dans ce cas, les corrections de la charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée, afin d'obtenir la tension en circuit ouvert. Les corrections peuvent être calculées à l'aide de la procédure donnée à l'Annexe C [2].

NOTE Si la même charge électrique est utilisée au cours de l'étalonnage pour un **hydrophone** particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions mesurées individuelles.

6.3.4 Charge électrique par les câbles prolongateurs

Si un câble prolongateur de longueur significative est relié à l'**hydrophone**, il applique une charge électrique sur l'**hydrophone** en réduisant la tension mesurée à l'extrémité du câble (et donc la sensibilité). Dans ce cas, des corrections doivent être appliquées afin d'obtenir la tension en circuit ouvert à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**. Des recommandations relatives au calcul de la correction de charge électrique sont données à l'Annexe C.

NOTE 1 Lorsque le câble et l'**hydrophone** semblent être purement des capacités d'un point de vue électrique (cela est généralement vrai pour un câble et est vrai pour un **hydrophone** dans la plage de fréquences bien en dessous de la résonance), une correction peut être déduite des capacités de l'**hydrophone** et du câble. Voir l'Annexe C pour de plus amples informations [23].

NOTE 2 Lorsque l'impédance électrique de l'**hydrophone** n'est pas purement une capacité, par exemple à des fréquences proches de la résonance, l'impédance électrique complexe de l'**hydrophone** et du câble prolongateur est utilisée pour calculer la correction de charge. Voir l'Annexe C pour de plus amples informations [23].

NOTE 3 Si le même câble prolongateur est utilisé au cours de l'étalonnage pour un **hydrophone** particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions mesurées individuelles.

6.3.5 Bruit électrique

Le rapport **signal** sur bruit doit être suffisant pour pouvoir effectuer les mesurages sans perte significative de précision. Il convient que la pression acoustique mesurée soit supérieure d'au moins 6 dB à la pression de bruit de largeur de bande équivalente (voir l'IEC 60500:2017).

Le niveau de bruit parasite à large bande peut être réduit par l'utilisation d'un filtre passe-bande. Toutefois, la bande passante doit être suffisamment large pour laisser passer le **signal** sans déformation.

NOTE 1 Le niveau de bruit électrique peut dégrader la précision lors de la réalisation de mesurages électriques [3], [4]. Le rapport **signal** sur bruit est susceptible de diminuer en cas d'utilisation de **projecteurs** à des fréquences bien inférieures à la résonance.

NOTE 2 En présence de bruit électrique, le rapport **signal** sur bruit peut être amélioré en faisant la moyenne cohérente des **signaux** répétés. Pour le bruit aléatoire, la moyenne de N **signaux** améliore le rapport **signal** sur bruit d'un facteur de $\sqrt{N}$ (racine carrée de N).

6.3.6 Diaphonie

En présence d'interférences cohérentes provenant de la diaphonie électrique, le moyennage des **signaux** et le filtrage à bande étroite n'entraînent pas en général une amélioration de la précision. Par conséquent, dans ce cas, des efforts doivent être entrepris pour déterminer la cause du problème, et des mesures doivent être prises pour réduire le plus possible les effets par une mise à la terre électrique, par exemple, des câbles de commande du **projecteur**.

Dans le cas d'un **signal** à ondes entretenues, le niveau de diaphonie électrique doit être au moins inférieur de 40 dB au niveau du **signal**.

Lorsque la diaphonie est présente avec des **signaux** à salves d'impulsions, cela ne provoque des interférences que si la longueur de la salve est supérieure au temps de propagation acoustique. Si la diaphonie ne peut pas être éliminée par une mise à la terre électrique adaptée, la longueur de la salve doit être réduite de sorte qu'il n'y ait pas de chevauchement dans le temps avec le **signal** acoustique.

NOTE Pour les **signaux** à salves, les effets des interférences peuvent également être réduits de manière significative par soustraction de signal. Il s'agit d'approcher le **signal** de diaphonie à la fréquence du **signal** d'entraînement dans la zone avant l'arrivée du **signal** acoustique, de poursuivre l'approximation pendant la durée du chevauchement du **signal** émis avec le **signal** acoustique, puis de le soustraire du **signal** total dans la zone du chevauchement. Les effets de la diaphonie peuvent également être déterminés en observant la variation du **signal** lorsque la distance entre le **projecteur** et le récepteur est modifiée selon une valeur prédéterminée (la moitié de la longueur d'onde acoustique, par exemple).

6.3.7 Préamplificateurs intégrés

Lorsqu'un **hydrophone** possède un préamplificateur intégré, la sensibilité doit être exprimée comme la sensibilité d'extrémité de câble (en incluant les performances du préamplificateur comme partie intégrante du dispositif).

NOTE Lorsqu'un **hydrophone** possède un préamplificateur intégré, les corrections de la charge électrique par les câbles prolongateurs ou les appareils de mesure sont inutiles [23].

6.4 Mesurage du courant d'attaque du projecteur

6.4.1 Instruments

Il convient que le courant traversant le **projecteur** soit déterminé par un transformateur de courant étalonné (produisant une tension proportionnelle au courant d'attaque).

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, la forme d'onde en tension du transformateur de courant doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Pour un **signal** à ondes entretenues, la tension du transformateur de courant doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée, d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure absolue, ces éléments doivent être étalonnés, sauf si le même canal de mesure est également utilisé uniquement pour mesurer les rapports des tensions.

NOTE Bien que le transformateur de courant soit l'appareil préférentiel, une autre méthode consiste à mesurer la chute de tension dans une résistance étalonnée de faible valeur (seulement quelques ohms) connectée en série avec le **projecteur**.

6.4.2 Analyse du signal

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, l'amplitude du **signal** (et, si cela est exigé, la phase du signal) doit être déterminée à partir de la forme d'onde en tension à fenêtre de temps provenant du transformateur de courant, la fenêtre de temps étant placée sur la partie en régime permanent du **signal** sans écho.

Le début et la fin de la fenêtre de temps doivent être placés sur la forme d'onde aux mêmes positions que celles choisies pour la tension de l'**hydrophone** (voir 6.3.2).

6.5 Mesurage de la tension d'attaque du projecteur

6.5.1 Instruments

La tension d'attaque dans le **projecteur** doit être déterminée par une sonde de tension à impédance élevée étalonnée (sonde oscilloscopique) ou d'un atténuateur étalonné visant à réduire la tension d'attaque d'environ 40 dB, de manière à pouvoir être mesurée par le numériseur.

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, la forme d'onde en tension de la sonde oscilloscopique ou d'un atténuateur étalonné doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Pour un **signal** à ondes entretenues, la tension de la sonde oscilloscopique ou d'un atténuateur étalonné doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée, d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure, ces éléments doivent être étalonnés, sauf si le même canal de mesure est également utilisé uniquement pour mesurer les rapports des tensions.

6.5.2 Analyse du signal

Pour les **signaux** à salves d'impulsions, l'amplitude du **signal** (et, si cela est exigé, la phase du **signal**) doit être déterminée à partir de la forme d'onde en tension à fenêtre de temps provenant de la sonde oscilloscopique ou d'un atténuateur étalonné, la fenêtre de temps étant placée sur la partie en régime permanent du **signal** sans écho.

Le début et la fin de la fenêtre de temps doivent être placés sur la forme d'onde aux mêmes positions que celles choisies pour la tension de l'**hydrophone** (voir 6.3.2).

7 Préparation et conditionnement des transducteurs

7.1 Trempage

Avant l'étalonnage, les **transducteurs** doivent être trempés pendant une courte durée suffisante pour permettre l'équilibrage de la température avec l'eau.

Si la température de l'air dans lequel le **transducteur** est stocké et préparé est proche de celle de l'eau (comme cela serait le cas pour une cuve d'essai en intérieur), la durée de trempage peut uniquement être de quelques minutes. Toutefois, si la température de l'eau est bien inférieure à la température ambiante du laboratoire (comme cela peut être le cas pour une installation en eau libre dans les conditions hivernales), un trempage d'au moins 30 min est recommandé.

7.2 Mouillage

Un produit mouillant (un détergent doux, par exemple) doit être appliqué sur la surface entière du **transducteur** avant immersion. Après immersion, aucune partie sèche ne doit être visible lorsque le **transducteur** est rapidement retiré de l'eau [24].

NOTE 1 Le mouillage du **transducteur** vise à atténuer les bulles de gaz ou l'air emprisonné collé à sa surface. L'air et les bulles emprisonnés sont à l'origine d'une diffusion importante des ondes acoustiques et peuvent se comporter de manière très résonante, générant des erreurs dans les résultats d'étalonnage. L'application d'un détergent comme produit mouillant permet de réduire la tension superficielle de l'eau et d'empêcher l'adhésion des bulles sur la surface.

NOTE 2 La présence d'air emprisonné peut parfois se manifester sous la forme d'une pellicule d'air présentant un éclat argenté sur la surface du **transducteur**. Tous les évidements sur le boîtier du **transducteur** (ceux situés à côté des joints d'étanchéité ou des fixations à vis, par exemple) peuvent emprisonner des bulles d'air. En présence évidente d'air emprisonné ou de bulles, le détergent peut être appliqué plusieurs fois.

NOTE 3 Le processus de fixation des bulles d'air sur la surface du **transducteur** apparaît plus évident lorsque des **transducteurs** chauds sont plongés dans de l'eau froide, car des **transducteurs** plus chauds présentent un léger effet thermique avec l'eau plus froide avec laquelle leur surface entre en contact, provoquant l'expulsion du gaz dissous de la solution (l'air étant moins soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide).

7.3 Prolongation du câble de l'hydrophone

S'il s'avère nécessaire d'allonger le câble de l'**hydrophone** pour les besoins de l'étalonnage (pour atteindre l'appareillage, par exemple), les recommandations de 6.3.4 doivent être suivies.

NOTE Une description de la manière de prendre en compte l'influence du câble prolongateur est donnée à l'Annexe C [23].

7.4 Conditions d'environnement (température et profondeur)

Si la sensibilité d'un **transducteur** est exigée pour des conditions particulières de température de l'eau et de profondeur d'immersion, le **transducteur** doit:

- être étalonné dans les mêmes conditions de température et de profondeur que celles dans lesquelles il est utilisé sur le terrain; ou
- avoir des valeurs de sensibilité corrigées en fonction des différentes conditions d'environnement, les corrections reposant sur des étalonnages précédents selon la température ou la profondeur ou étant apportées à l'aide de modèles analytiques validés.

NOTE 1 La sensibilité de certains **transducteurs électroacoustiques** peut varier avec la température ambiante et la profondeur d'immersion (cette dernière étant due à une augmentation de la pression hydrostatique) [25], [26]. Il est relativement rare de pouvoir procéder aux étalonnages dans une plage de valeurs de température et de profondeur car des installations spécialisées sont exigées [25], [26].

NOTE 2 Les conditions d'environnement qui existent dans une cuve d'essai en intérieur sont peu susceptibles de répliquer les conditions océaniques (pour la température de l'eau ou la profondeur, par exemple). Les étalonnages sont parfaitement valides pour les conditions rencontrées pendant l'étalonnage uniquement. Si une estimation des performances dans les conditions océaniques est exigée, la sensibilité obtenue dans le cadre de l'étalonnage de la cuve peut être corrigée (en ajoutant une composante d'incertitude adaptée pour refléter l'incertitude de la correction) [25], [26].

NOTE 3 Pour les mesurages réalisés dans des installations en eau libre, les conditions d'environnement (température de l'eau ou profondeur) sont, en général, différentes de celles de l'application finale prévue. Si une estimation des performances est exigée dans les conditions correspondant à l'application finale, la sensibilité obtenue avec l'installation en eau libre peut être corrigée (en ajoutant une composante d'incertitude adaptée pour refléter l'incertitude de la correction) [27].

8 Étalonnage par réciprocité d'onde sphérique en champ libre à trois transducteurs

8.1 Principe général

Trois **transducteurs** (triade de **transducteurs**) doivent être utilisés pour la technique d'étalonnage, l'un au moins doit être réciproque. Pour des raisons pratiques, les trois dispositifs doivent porter les étiquettes P (**projecteur**), H (**hydrophone**) et T (**transducteur** réciproque).

Les dispositifs doivent être rassemblés en trois configurations de mesure (voir Figure 1). Si le **projecteur**, P, est également un **transducteur** réciproque, la quatrième configuration également représentée à la Figure 1 doit également être utilisée.

Pour chaque configuration de mesure, le couple de **transducteurs** doit être déployé dans l'eau et séparé selon une distance connue, d , leurs axes étant alignés l'un avec l'autre (8.2.1, 8.2.2).

Pour toutes les configurations, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

Dans chaque cas, utilisant un dispositif en tant que **projecteur** et l'autre en tant qu'**hydrophone**, l'**impédance électrique de transfert** doit être déterminée au nombre souhaité de fréquences sur toute la plage de fréquences à l'étude (8.2.4).

En utilisant au moins les trois premières configurations de couples de **transducteurs**, la **sensibilité de réception en champ libre** et la **réponse à l'émission en courant** de l'un des trois dispositifs sont calculées à chaque fréquence d'étalonnage à partir de grandeurs purement électriques (impédances de transfert), de la distance de séparation, de la densité de l'eau et de la fréquence acoustique. (8.2.5, 8.2.6).

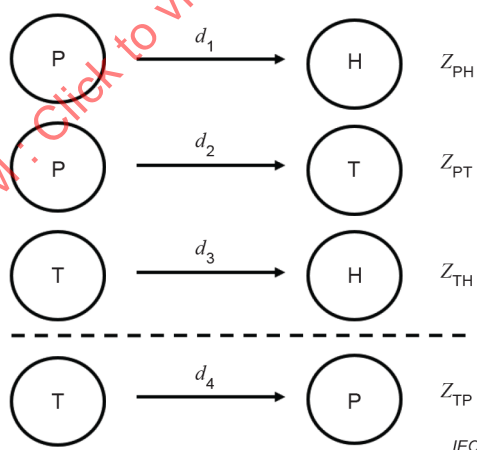


Figure 1 – Configurations de mesure de la réciprocité à trois transducteurs

Si le **projecteur**, P, est également un **transducteur** réciproque, le mesurage de la quatrième **impédance électrique de transfert** (voir Figure 1) peut être utilisé pour déterminer la validité de l'hypothèse du comportement réciproque (8.2.8). Les dérivations détaillées de toutes les formules pour les étalonnages de réciprocité se trouvent à l'Annexe G.

NOTE 1 Un certain nombre de configurations d'étalonnage reposent sur le principe de réciprocité acoustique. [28] à [32]. La présente description de la méthode d'étalonnage par réciprocité concerne uniquement la réciprocité d'onde sphérique à trois **transducteurs**. La méthode d'étalonnage par réciprocité peut être appliquée à d'autres configurations qui utilisent des géométries de champ acoustique différentes (onde plane acoustique ou onde cylindrique, par exemple) et peut être appliquée à des étalonnages de pression réalisés à l'intérieur d'un coupleur fermé [1], [3], [33] à [36]. Un étalonnage par autorécaprocité peut également être utilisé à l'aide d'un réflecteur offrant une réflexion acoustique spéculaire. [2], [37] à [39]. Dans chaque cas, même si le principe est similaire, l'impédance

acoustique de transfert différente entre la source et le récepteur donne une formule de calcul différente des sensibilités du dispositif.

NOTE 2 Il s'agit d'une méthode d'étalonnage primaire qui ne s'appuie pas sur l'utilisation d'un autre **transducteur** de référence acoustique. Les étalonnages acoustiques sont traçables par rapport aux étalons primaires de mesure électrique, de mesure de longueur et de mesure de fréquence.

NOTE 3 Chaque configuration de mesure implique de déployer un couple de **transducteurs** dans l'eau. Cela est souvent réalisé à l'aide de deux systèmes de position ou montages pour l'alignement, les **transducteurs** étant rassemblés selon la Figure 1. Toutefois, les trois éléments peuvent également être placés en même temps dans la cuve d'essai. Une disposition est une configuration colinéaire (voir Figure 2). En variante, les **transducteurs** peuvent être placés dans une configuration géométrique triangulaire (en règle générale, un triangle équilatéral). Dans les dispositions prévoyant de plonger simultanément les dispositifs, les **transducteurs** sont configurés de manière à pouvoir être tournés afin d'aligner leurs directions de référence avant de mesurer chaque impédance de transfert. Noter que si trois dispositifs sont plongés simultanément, il existe une possibilité de diffusion du son d'un dispositif, provoquant des interférences acoustiques lors des mesurages réalisés avec les deux autres dispositifs. Dans ce cas, le dispositif qui n'est pas utilisé est retiré de l'eau pendant le mesurage des impédances électriques de transfert entre les deux autres dispositifs.

8.2 Étalonnage pour déterminer le module de sensibilité (sans phase)

8.2.1 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

8.2.2 Distance de séparation

La distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être choisie et mesurée selon les exigences de 5.6.5.

Lors du choix de la distance de séparation, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2) et aux conditions de **champ acoustique lointain** (5.3) doivent être satisfaites.

Il est recommandé de répéter chaque étalonnage à une distance de séparation différente (8.2.7).

NOTE Pour des raisons de simplicité, les distances de séparation choisies entre chaque étape des mesurages représentés à la Figure 1 sont parfois identiques, mais ce n'est pas nécessaire.

8.2.3 Préparation, montage et alignement du transducteur

Avant de commencer les mesurages, les exigences en matière de trempage (7.1) et de mouillage (7.2) des **transducteurs** doivent être satisfaites.

Pour chaque mesurage de l'impédance électrique de transfert, les exigences relatives au montage du **transducteur** (5.6.3) et à l'alignement du **transducteur** (5.6.4) doivent être satisfaites.

8.2.4 Forme du signal

La forme du **signal** doit être choisie selon 6.1.

8.2.5 Mesurage de l'impédance électrique de transfert

Pour chaque configuration de mesure représentée à la Figure 1 et à chaque fréquence acoustique, l'**impédance électrique de transfert** doit être déterminée en mesurant la tension de l'**hydrophone** selon 6.3, et le courant d'attaque du **projecteur** selon 6.4. La tension et le courant doivent être exprimés dans la même métrique (par exemple, grandeurs crêtes ou grandeurs efficaces).

NOTE 1 Pour une plus grande précision, le courant d'attaque du **projecteur** peut être mesuré à travers le même canal de mesure que celui de la tension de l'**hydrophone** (le canal de mesure étant composé d'un amplificateur,

d'un filtre et d'un numériseur). Dans ce cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas d'étalonnage absolu, étant donné que seuls les rapports de grandeurs électriques sont exigés.

NOTE 2 Si cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant du **projecteur** avec la tension de l'**hydrophone**. Cela réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Si des fréquences acoustiques très élevées sont utilisées, chaque **impédance électrique de transfert** est corrigée de la perte due à l'absorption acoustique par l'eau. De plus amples informations sont données en 5.8.1 et à l'Annexe E.

8.2.6 Calcul des sensibilités de réception

À chaque fréquence acoustique, le module de la **sensibilité de réception en champ libre** $\underline{M}_H$ de l'**hydrophone** doit être calculé à l'aide de la Formule (11):

$$|\underline{M}_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|\underline{Z}_{PH}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PT}|}} \quad (11)$$

À chaque fréquence acoustique, le module de la **sensibilité de réception en champ libre** $\underline{M}_T$ du **transducteur réciproque** doit être calculé à l'aide de la Formule (12):

$$|\underline{M}_T| = \sqrt{\frac{2d_2d_3}{\rho f d_1} \frac{|\underline{Z}_{PT}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PH}|}} \quad (12)$$

Si le **projecteur** est réciproque, son module de sensibilité en champ libre doit être calculé à partir de la relation donnée par à l'aide de la Formule (12) avec l'indice PT remplacé par TP, et la distance d_2 remplacée par d_4 .

NOTE Si le **projecteur** n'est pas réciproque, sa sensibilité de réception calculée n'a aucune signification physique.

8.2.7 Calcul des sensibilités d'émission

À chaque fréquence acoustique, le module de la **réponse à l'émission en courant** $\underline{S}_{I,P}$, du **projecteur** (P) doit être calculé à l'aide de la Formule (13):

$$|\underline{S}_{I,P}| = \sqrt{\frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{|\underline{Z}_{PH}||\underline{Z}_{TT}|}{|\underline{Z}_{TH}|}} \quad (13)$$

La **réponse à l'émission en courant** $\underline{S}_{I,T}$ du **transducteur** (T) doit être calculée à l'aide de la Formule (14):

$$|\underline{S}_{I,T}| = \sqrt{\frac{\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{|\underline{Z}_{PT}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PH}|}} \quad (14)$$

Si cela est exigé, la réponse à l'émission en tension du **projecteur** ou du **transducteur** ($\underline{S}_V$) doit être calculée à l'aide de la Formule (15):

$$\underline{S}_V = \frac{\underline{S}_I}{\underline{Z}_P} \quad (15)$$

où $\underline{Z}_P$ est l'impédance électrique mesurée du dispositif (voir Annexe B).

Si l'**hydrophone** H est réciproque, le module de sa **réponse à l'émission en courant** $|S|_H$ doit être calculé à l'aide de la Formule (14) en remplaçant $|Z|_{PH}$ par $|Z|_{PT}$, $|Z|_{PT}$ par $|Z|_{PH}$ et la distance d_2 par d_4 .

NOTE La réponse à l'émission n'a pas de signification physique lorsque le **transducteur** ne peut pas être utilisé comme source sonore (par exemple, pour un **hydrophone** avec un préamplificateur intégré, ce qui exclut son utilisation comme **projecteur**).

8.2.8 Répétabilité

L'étalonnage doit être répété plusieurs fois et la moyenne des résultats à chaque fréquence doit être utilisée comme la valeur finale de sensibilité. Les étalonnages répétés doivent être totalement indépendants, les **transducteurs** étant retirés de l'eau et remontés entre chaque étalonnage.

L'écart type doit être déterminé et utilisé dans le calcul des incertitudes (voir l'Annexe F).

Il est recommandé de procéder à au moins quatre mesurages répétés.

NOTE 1 Si une distance de séparation différente est utilisée pour certains des étalonnages répétés, cela facilite l'évaluation de certaines hypothèses de la méthode (conditions de champ libre, champ d'onde sphérique, etc.), étant donné que la sensibilité ne varie pas avec la distance de séparation pour les ondes à propagation sphérique dans les conditions de champ libre (avec les corrections apportées pour l'absorption par l'eau aux fréquences élevées).

NOTE 2 Le manque de bonne répétabilité indique un problème avec l'étalonnage. Cela peut s'expliquer par un mauvais rapport **signal** sur bruit, par la présence de réflexions acoustiques, par un positionnement et un alignement imprécis, par une mauvaise stabilité temporelle des performances des **transducteurs** acoustiques ou des appareils. Il est possible d'obtenir, avec précaution, des écarts types pouvant descendre jusqu'à 1 % pour les **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement.

8.2.9 Vérification et contrôles

8.2.9.1 Vérification de la réciprocité

L'hypothèse selon laquelle au moins un **transducteur** est réciproque doit être vérifiée.

La réciprocité d'un couple de **transducteurs** réciproques doit être vérifiée en comparant les amplitudes de l'**impédance électrique de transfert** lorsque les fonctions de l'émetteur et du récepteur sont interverties sans modifier la position des **transducteurs** (c'est-à-dire en comparant $|Z|_{PT}$ et $|Z|_{TP}$ où P et T sont réciproques) [3], [4], [40].

Si des divergences importantes entre $|Z|_{PT}$ et $|Z|_{TP}$ se produisent, peut-être que l'un des **transducteurs** (ou les deux) est trop sollicité, entraînant un comportement non linéaire. Dans ce cas, l'amplitude du **signal** d'entraînement vers les **transducteurs** doit être réduite, et le contrôle de l'impédance de transfert répété. Cependant, si une réduction du **signal** d'entraînement se traduit par un rapport **signal** sur bruit beaucoup trop faible, l'utilisation de **transducteurs** alternatifs doit être envisagée.

Pour l'incertitude la plus faible dans les étalonnages par réciprocité, il convient d'utiliser les **transducteurs** réciproques dans leur bande normale de fonctionnement (généralement jusqu'à 0,7 fois la fréquence de la première résonance pour un **transducteur** piézoélectrique).

L'utilisation d'un **transducteur** à des fréquences hors de sa plage dynamique linéaire ou de sa plage de fréquences de fonctionnement (par exemple, à des fréquences bien supérieures à la fréquence de résonance) peut entraîner un comportement non réciproque et une dégradation de la précision de l'étalonnage. L'étalonnage d'un **hydrophone** sur une large plage de fréquences peut exiger l'utilisation de plusieurs **transducteurs** réciproques différents, afin de couvrir la plage complète avec une incertitude suffisamment faible.

NOTE 1 Il n'est pas possible de déterminer si un **transducteur** est réciproque sans l'utiliser en combinaison avec un autre **transducteur**. Le contrôle décrit ci-dessus donne une bonne indication de la réciprocité d'un couple de **transducteurs**.

NOTE 2 Pour les **transducteurs** qui fonctionnent bien dans leur plage de fréquences de fonctionnement, il est possible d'obtenir un accord entre les impédances électriques de transfert de plus de 3 %.

NOTE 3 Un désaccord de plus de 10 % indique qu'au moins un des **transducteurs** peut ne pas se comporter de manière réciproque. L'utilisation d'un troisième **transducteur réversible** dans la vérification de la réciprocité peut révéler lequel des **transducteurs** n'est pas réciproque. Dans un étalonnage par réciprocité, des **transducteurs** non réciproques peuvent uniquement être utilisés comme **projecteur** ou comme **hydrophone** (selon le cas), mais pas comme le **transducteur T**.

NOTE 4 Si les **transducteurs** dans la vérification de la réciprocité sont de construction identique, ils peuvent être non linéaires de la même façon et toujours sembler réciproques. Par conséquent, dans l'idéal, la réciprocité est vérifiée à l'aide de **transducteurs** de différents modèles, dimensions ou constructions.

NOTE 5 Une plus grande précision statistique est obtenue de l'étalonnage si plusieurs **transducteurs** sont réciproques. Si le **projecteur** peut également être utilisé comme un **hydrophone**, la sensibilité de l'**hydrophone** M_H peut être déterminée de deux manières: avec $|Z|_{PT}$ ou $|Z|_{TP}$ sur le dénominateur de la Formule (11). L'incertitude de la moyenne des deux valeurs de sensibilité est inférieure à celle de chaque valeur prise séparément.

NOTE 6 Si l'étalonnage est effectué avec plus de trois **transducteurs**, et si deux au moins sont réciproques, l'incertitude est réduite parce que la sensibilité peut être calculée plusieurs fois à partir de résultats indépendants provenant de différentes associations de **transducteurs**. La moyenne de tous les résultats, à une même fréquence, présente une incertitude statistique inférieure à celle de chaque valeur prise séparément.

8.2.9.2 Vérification de l'onde sphérique

L'écart par rapport au champ d'onde sphérique pris pour hypothèse doit être pris en considération, et l'influence de tout écart doit être reflétée dans l'évaluation de l'incertitude globale.

Dans des conditions idéales, il est possible d'obtenir un écart inférieur à ± 2 %. Une variation de plus de ± 5 % indique des problèmes supplémentaires (par exemple à partir des réflexions limites). Dans ce cas, procéder à un examen pour en définir la cause.

En cas de fonctionnement à des fréquences de plusieurs centaines de kilohertz, il est exigé de corriger l'**impédance électrique de transfert** pour tenir compte de l'absorption du son par l'eau (voir 5.8.1 et l'Annexe E).

NOTE 1 L'existence d'un champ acoustique à propagation sphérique peut être vérifiée par comparaison des amplitudes de l'**impédance électrique de transfert** lorsque la distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** est modifiée. Voir l'Annexe E. Si l'**hydrophone** est placé dans le champ lointain du **projecteur**, l'impédance de transfert est inversement proportionnelle à la distance d entre les centres de référence du **projecteur** et de l'**hydrophone**:

$$|Z_{PH}| d = \text{constante} \quad (16)$$

8.2.9.3 Vérification de la linéarité

Les **signaux** mesurés doivent être vérifiés pour détecter une déformation pendant les étalonnages. En cas de doute concernant la linéarité des **transducteurs**, la linéarité de chaque couple de **transducteurs** doit être vérifiée en comparant les amplitudes de l'**impédance électrique de transfert** à différentes valeurs du courant du **projecteur** dans la plage dynamique du système, à une fréquence spécifique. Depuis le niveau situé à 6 dB au-dessus du bruit de fond, jusqu'au niveau maximal, l'amplitude de l'impédance de transfert doit rester constante dans les limites de 5 %.

Pendant l'étalonnage, assurer que les niveaux de **signal** restent dans les limites de la plage de linéarité. Sachant que cette plage peut varier pour chaque couple de **transducteurs**, une observation minutieuse des niveaux de **signal** est nécessaire.

NOTE Une déformation peut se produire par la présence d'harmoniques plus élevés dans le **signal**, évidents après un examen des niveaux spectraux. Dans l'idéal, tous les harmoniques sont inférieurs de plus de 10 dB en amplitude à la fondamentale.

8.2.9.4 Inclusion des transducteurs de référence étalonnés dans la triade de transducteurs

Si au moins l'un des **transducteurs** utilisés dans l'étalonnage est un **transducteur** de référence dont la sensibilité est connue par de précédents étalonnages, un accord correct obtenu avec les valeurs connues de sensibilité pour les dispositifs de référence donne une confiance supplémentaire dans les résultats pour le **transducteur** en essai.

NOTE Dans un étalonnage par réciprocité, les sensibilités absolues sont obtenues pour les trois **transducteurs** utilisés dans la triade. Il n'est pas exigé de s'appuyer sur la sensibilité d'un **transducteur** lors de l'étalonnage de l'autre. Toutefois, si l'étalonnage a pour objet de déduire la sensibilité d'un **transducteur** particulier dont les performances sont inconnues, l'utilisation de **transducteurs** de référence étalonnés comme autres dispositifs dans la triade de **transducteurs** peut fournir une vérification supplémentaire de la précision des résultats pour les **transducteurs** en essai (en prenant pour hypothèse que les **transducteurs** de référence sont stables).

8.2.10 Incertitude

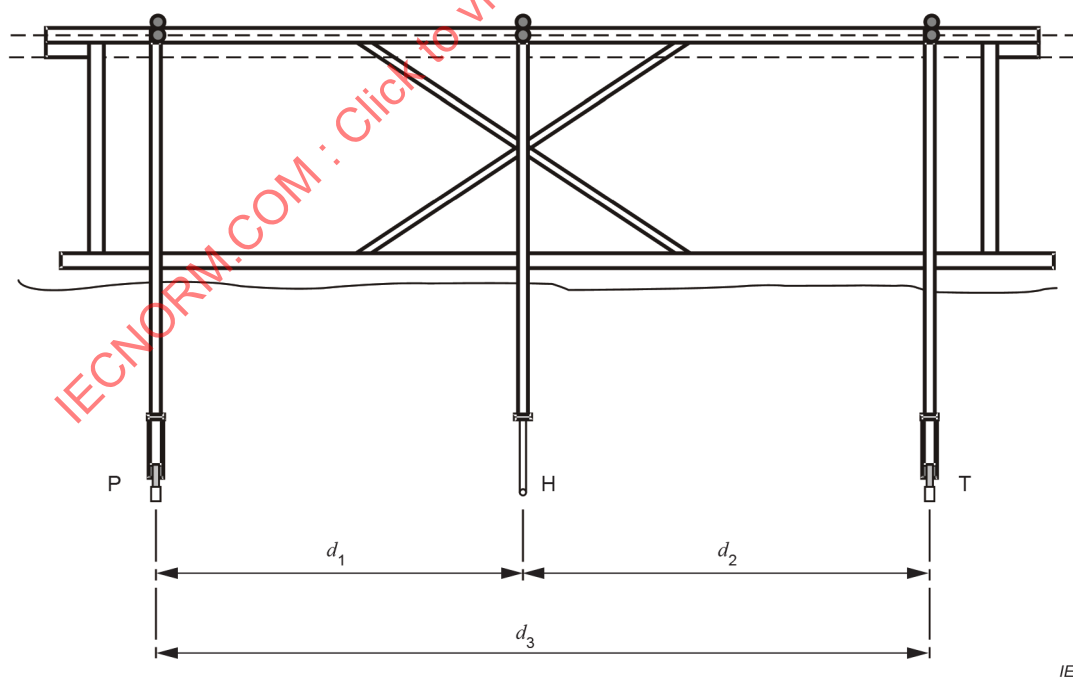
Si l'incertitude élargie (niveau de confiance de 95 %) est déterminée avec soin et selon les procédures ci-dessus, elle doit être comprise entre 4 % et 10 %.

NOTE L'évaluation de l'incertitude pour la méthode d'étalonnage par réciprocité en champ libre implique de nombreux facteurs (voir Annexe F pour de plus amples informations) [40] à [43].

8.3 Étalonnage pour déterminer la phase de la sensibilité de l'hydrophone

8.3.1 Principe général

Pour déterminer l'angle de phase de la sensibilité de l'**hydrophone**, la configuration de mesure adoptée doit être la disposition colinéaire décrite à la Figure 2 [44] à [46]. Cette disposition permet de réduire le plus possible les erreurs de phase dues à des erreurs de positionnement. Dans la disposition, les trois **transducteurs** P, T et H sont montés en ligne droite, H étant placé entre P et T, de sorte que $d_2 = d_1 + d_3$.



IEC

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

Les mesurages doivent être réalisés comme suit.

Monter les **transducteurs** comme représenté à la Figure 2 avec leurs centres de référence séparés par les distances d_1 , d_2 et d_3 , où $d_2 = d_1 + d_3$.

Aligner leurs directions de référence sur P, dirigé vers H et T. Déterminer l'**impédance électrique de transfert** complexe Z_{PH} à partir du courant d'entrée vers P et de la tension de sortie provenant de H.

Enlever l'**hydrophone** avec son crochet du cadre. Déterminer l'**impédance électrique de transfert** complexe Z_{PT} à partir du courant d'entrée vers P et de la tension de sortie provenant de T.

Replacer l'**hydrophone** avec son crochet dans le cadre et tourner autour de son centre de référence, de sorte que T soit à présent dirigé vers H et que la distance d_3 soit maintenue entre les centres de référence de H et T. Déterminer l'**impédance électrique de transfert** complexe Z_{TH} à partir du courant d'entrée vers T et de la tension de sortie provenant de H.

Calculer le module et l'angle de phase de la sensibilité en champ libre de l'**hydrophone** conformément aux instructions de 8.3.6 en utilisant les impédances électriques de transfert mesurées [44] à [46].

NOTE 1 La difficulté liée à la détermination de la phase de M_H par cette méthode réside dans la détermination précise de la vitesse du son et des distances de mesure d_1 , d_2 et d_3 . Par exemple, à 100 kHz dans l'eau, une erreur de 1,0 mm seulement dans une distance quelconque donne une erreur de phase d'environ 12° [45].

NOTE 2 La sensibilité résultante est représentative à la fois de l'**hydrophone** et de son montage.

NOTE 3 Dans l'idéal, l'étalonnage est réalisé avec le même montage que celui qui soutient l'**hydrophone** lorsqu'il est utilisé pour les mesurages de champs.

8.3.2 Préparation du transducteur

Avant de commencer les mesurages, les exigences en matière de trempage (7.1) et de mouillage (7.2) des **transducteurs** doivent être satisfaites.

8.3.3 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

8.3.4 Forme du signal

La forme du **signal** doit être conforme à 6.1.

8.3.5 Montage et alignement du transducteur

La distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être choisie et mesurée selon les exigences de 5.6.5.

Lors du choix de la distance de séparation, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2) et aux conditions de **champ acoustique lointain** (5.3) doivent être satisfaites.

8.3.6 Mesurage de l'impédance électrique de transfert

Pour chaque configuration de mesure représentée à la Figure 1 et à chaque fréquence acoustique, l'**impédance électrique de transfert** à valeur complexe doit être déterminée en mesurant la tension de l'**hydrophone** selon 6.3, et le courant d'attaque du **projecteur** selon 6.4.

Chaque **impédance électrique de transfert** complexe (par exemple, $\underline{Z}_{PH}$) doit être mesurée (voir 3.2) et calculée comme suit:

$$\underline{Z}_{PH} = \frac{\mathcal{F}(U_H(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} \quad (17)$$

NOTE 1 Pour une plus grande précision, le courant d'attaque du **projecteur** peut être mesuré à travers le même canal de mesure que celui de la tension de l'**hydrophone** (le canal de mesure étant composé d'un amplificateur, d'un filtre et d'un numériseur). Dans ce cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas d'étalonnage absolu, étant donné que seuls les rapports de grandeurs électriques sont exigés.

NOTE 2 Si cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant du **projecteur** avec la tension de l'**hydrophone**. Cela réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Si des fréquences acoustiques très élevées sont utilisées, chaque **impédance électrique de transfert** peut être corrigée de la perte due à l'absorption acoustique par l'eau. De plus amples informations sont données en 5.8.1 et à l'Annexe E.

8.3.7 Calcul de l'angle de phase de la sensibilité

À chaque fréquence acoustique, la **sensibilité de réception en champ libre** à valeur complexe $\underline{M}_H$ de l'**hydrophone** doit être calculée comme suit:

$$\underline{M}_H = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{j\rho f d_2} \frac{\underline{Z}_{PH}\underline{Z}_{TH}}{\underline{Z}_{PT}}} \quad (18)$$

Le module seul de la sensibilité $|\underline{M}_H|$ peut être calculé comme suit:

$$|\underline{M}_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|\underline{Z}_{PH}||\underline{Z}_{TH}|}{|\underline{Z}_{PT}|}} \quad (19)$$

L'angle de phase seul de la sensibilité θ_H peut être calculé comme suit:

$$\theta_H = \frac{1}{2} \left(\Delta\theta_{PH} + \Delta\theta_{TH} - \Delta\theta_{PT} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (20)$$

où θ_{PH} est l'angle de phase de $\underline{Z}_{PH}$, etc. [45].

NOTE Étant donné que les distances et la vitesse du son n'apparaissent pas explicitement dans un terme de phase dans la Formule (18), la précision de la phase calculée de $\underline{M}_H$ est uniquement limitée par la précision des mesurages de phase des tensions et des courants et par le positionnement. Un cadre de mesure particulier pouvant réduire le plus possible les erreurs de positionnement est représenté à la Figure 2.

8.3.8 Répétabilité

L'étalonnage doit être répété plusieurs fois et la moyenne des résultats à chaque fréquence doit être utilisée comme la valeur finale de sensibilité. Les étalonnages répétés doivent être totalement indépendants, les **transducteurs** étant retirés de l'eau et remontés entre chaque étalonnage.

L'écart type doit être déterminé et utilisé dans le calcul des incertitudes (voir l'Annexe F).

Il est recommandé de procéder à au moins quatre mesurages répétés.

NOTE 1 Si une distance de séparation différente est utilisée pour certains des étalonnages répétés, cela facilite l'évaluation de certaines hypothèses de la méthode (conditions de champ libre, champ d'onde sphérique, etc.), étant donné que la sensibilité ne varie pas avec la distance de séparation pour les ondes à propagation sphérique dans les conditions de champ libre (avec les corrections apportées pour l'absorption par l'eau aux fréquences élevées).

NOTE 2 Le manque de bonne répétabilité indique un problème avec l'étalonnage. Cela peut s'expliquer par un mauvais rapport **signal** sur bruit, par la présence de réflexions acoustiques, par un positionnement et un alignement imprécis, par une mauvaise stabilité temporelle des performances des **transducteurs** acoustiques ou des appareils. Il est possible d'obtenir, avec précaution, des écarts types pouvant descendre jusqu'à 1 % pour les **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement.

8.3.9 Vérification et contrôle

Les contrôles de vérification du comportement réciproque doivent être réalisés selon 8.2.9.1.

Les contrôles de champ d'onde sphérique doivent être réalisés selon 8.2.9.2.

Les contrôles de linéarité du **transducteur** doivent être réalisés selon 8.2.9.3.

Dans la mesure du possible, les **transducteurs** dont la sensibilité est connue doivent être inclus dans la triade de **transducteurs** conformément à 8.2.9.4.

8.3.10 Incertitude

Dans de bonnes conditions et un positionnement précis, il est possible d'obtenir une incertitude élargie globale inférieure à 5° en phase pour des fréquences jusqu'à 50 kHz, passant à 10° en phase pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, et à 20° en phase pour des fréquences jusqu'à 300 kHz [44] à [46].

NOTE 1 L'évaluation de l'incertitude implique de nombreux facteurs (voir l'Annexe F).

NOTE 2 Pour une présentation des manières de réduire l'incertitude de la mesure de phase provoquée par une distance imprécise entre les centres acoustiques de l'**hydrophone** et du **projecteur**, et déterminer le déplacement du centre acoustique par rapport au centre de référence, voir la référence [46].

9 Étalonnage en champ libre par comparaison avec un dispositif acoustique de référence

9.1 Principes

L'étalonnage des **hydrophones** ou des **projecteurs** dans les conditions de champ libre peut être réalisé à l'aide d'un **transducteur** acoustique de référence qui a préalablement fait l'objet d'un étalonnage absolu. Cet étalonnage exige d'utiliser soit un **hydrophone** étalonné soit un **projecteur** étalonné [3] à [6].

NOTE L'étalonnage par une méthode de comparaison présente en général une incertitude plus importante qu'une méthode primaire (comme une méthode reposant sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude de l'étalonnage du dispositif de référence introduit inévitablement un facteur d'incertitude de Type B supplémentaire. Des recommandations supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données à l'Annexe F.

9.2 Types de méthodes d'étalonnage par comparaison

9.2.1 Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un hydrophone de référence étalonné

Le champ acoustique généré par un **projecteur** auxiliaire dans l'eau est mesuré en un point du **champ acoustique lointain** avec un **hydrophone** de référence étalonné. L'**hydrophone** de référence est ensuite remplacé par l'**hydrophone** en essai. Le rapport des tensions en circuit ouvert des deux **hydrophones** est égal au rapport de leurs sensibilités en champ libre, ce qui permet de déterminer la **sensibilité de réception en champ libre** de l'**hydrophone** en essai. Le **projecteur** auxiliaire peut ne pas être étalonné, et peut être stable uniquement pendant la durée de l'étalonnage.

9.2.2 Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un projecteur de référence étalonné

Le champ acoustique généré dans l'eau par un **projecteur** de référence étalonné est mesuré par l'**hydrophone** en essai en un point du **champ acoustique lointain**. La sensibilité en champ libre de cet **hydrophone** est déterminée à partir du mesurage de la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone**, de la distance de séparation **projecteur-hydrophone**, de la sensibilité d'émission du **projecteur** étalonné et du **signal** d'entraînement électrique appliqué au **projecteur**. Pour le **projecteur** étalonné, la **réponse à l'émission en courant** ou la **réponse à l'émission en tension** peut être utilisée, ce qui exige de mesurer le courant électrique d'attaque ou la tension d'attaque, respectivement.

9.2.3 Étalonnage du projecteur à l'aide d'un hydrophone de référence étalonné

Le champ acoustique généré dans l'eau par le **projecteur** en essai est mesuré par un **hydrophone** de référence étalonné en un point du **champ acoustique lointain**. La sensibilité d'émission en champ libre du **projecteur** est déterminée à partir du mesurage de la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone**, de la distance de séparation **projecteur-hydrophone**, de la **sensibilité de réception en champ libre** de l'**hydrophone** de référence étalonné et du **signal** d'entraînement électrique appliqué au **projecteur**. Pour le **projecteur**, la **réponse à l'émission en courant** ou la **réponse à l'émission en tension** peut être déterminée, ce qui exige de mesurer le courant électrique d'attaque ou la tension d'attaque, respectivement.

9.3 Étalonnage de l'hydrophone par comparaison avec un hydrophone de référence

9.3.1 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

9.3.2 Distance de séparation

La distance entre le **projecteur** auxiliaire et l'**hydrophone** doit être choisie et mesurée selon les exigences de 5.6.5.

Lors du choix de la distance de séparation, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2) et aux conditions de **champ acoustique lointain** (5.3) doivent être satisfaites.

Il est recommandé de réaliser chaque étalonnage répété à une distance de séparation différente.

NOTE Une distance inférieure à celle qui est exigée pour les conditions de champ libre peut être admise si l'**hydrophone** en essai est comparé avec un **hydrophone** étalonné au même endroit du champ acoustique. Cela est possible lorsque les deux **hydrophones** sont exposés à la même pression acoustique et si aucun des deux **hydrophones** ne répond aux gradients de pression acoustique. Pour cela, les deux **hydrophones** ont essentiellement une structure ou des dimensions identique(s) (ou très similaire(s)) ou ont des dimensions inférieures à une longueur d'onde acoustique [4].

9.3.3 Préparation, montage et alignement du transducteur

Avant de commencer les mesurages, les exigences en matière de trempage (7.1) et de mouillage (7.2) des **transducteurs** doivent être satisfaites.

Pour chaque mesurage de l'impédance électrique de transfert, les exigences relatives au montage du **transducteur** (5.6.3) et à l'alignement du **transducteur** (5.6.4) doivent être satisfaites.

9.3.4 Forme du signal

La forme du **signal** doit être choisie selon 6.1.

9.3.5 Mesurage de la tension électrique

Pour l'**hydrophone** en essai et l'**hydrophone** de référence, la tension de l'**hydrophone** doit être mesurée selon 6.3. Les deux tensions doivent être exprimées dans la même métrique (par exemple, tensions crêtes ou grandeurs efficaces).

Pendant les mesurages, lors de la vérification de la stabilité du **transducteur** source entre les batteries de mesures, le courant d'attaque du **projecteur** doit être mesuré selon 6.4.

NOTE 1 Pour une plus grande précision, les tensions de l'**hydrophone** peuvent être mesurées à travers le même canal de mesure (le canal de mesure étant composé d'un amplificateur, d'un filtre et d'un numériseur). Dans ce cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas d'étalonnage absolu, étant donné que seuls les rapports de grandeurs électriques sont exigés.

NOTE 2 Si cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser les tensions. Cela réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

9.3.6 Sensibilité en champ libre

Le module de la **sensibilité de réception en champ libre** de l'**hydrophone** en essai, $|M_H|$, doit être calculé à partir du rapport des tensions en circuit ouvert de l'**hydrophone** en essai, U_H , et de l'**hydrophone** de référence, U_R , et de la sensibilité de l'**hydrophone** de référence étalonné $|M_R|$, comme suit:

$$|M_H| = \frac{U_H}{U_R} |M_R| \quad (21)$$

9.3.7 Répétabilité

L'étalonnage doit être répété plusieurs fois et la moyenne des résultats à chaque fréquence doit être utilisée comme la valeur finale de sensibilité. Les étalonnages répétés doivent être totalement indépendants, les **transducteurs** étant retirés de l'eau et remontés entre chaque étalonnage.

L'écart type doit être déterminé et utilisé dans le calcul des incertitudes (voir l'Annexe F).

Il est recommandé de procéder à au moins quatre mesurages répétés. Si deux **hydrophones** de référence différents sont utilisés, il est recommandé d'utiliser chacun d'eux pour deux des répétitions.

NOTE 1 Si une distance de séparation différente est utilisée pour certains des étalonnages répétés, cela facilite l'évaluation de certaines hypothèses de la méthode (conditions de champ libre, champ d'onde sphérique, etc.), étant donné que la sensibilité ne varie pas avec la distance de séparation pour les ondes à propagation sphérique dans les conditions de champ libre (avec les corrections apportées pour l'absorption par l'eau aux fréquences élevées).

NOTE 2 Le manque de bonne répétabilité indique un problème avec l'étalonnage. Cela peut s'expliquer par un mauvais rapport **signal** sur bruit, par la présence de réflexions acoustiques, par un positionnement et un alignement imprécis, par une mauvaise stabilité temporelle des performances des **transducteurs** acoustiques ou des appareils. Il est possible d'obtenir, avec précaution, des écarts types pouvant descendre jusqu'à 1 % pour les **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement.

9.3.8 Vérification et contrôles

Les **signaux** mesurés doivent être vérifiés pour détecter une déformation pendant les étalonnages. En présence d'une déformation significative, le niveau d'entraînement du **projecteur** doit être réduit.

L'utilisation de deux **hydrophones** de référence différents pour les batteries de mesures répétées limite le risque d'instabilité temporelle dans la sensibilité de l'**hydrophone** de référence depuis son dernier étalonnage primaire.

Pour limiter la possibilité que l'**hydrophone** de référence ne modifie sa sensibilité depuis son dernier étalonnage absolu, il est recommandé d'utiliser deux **hydrophones** de référence pour les différents étalonnages répétés. Les sensibilités calculées sont les mêmes avec l'un ou l'autre des **hydrophones** de référence. Le degré de divergence des résultats donne une indication de la stabilité des deux **hydrophones** de référence (il est très peu probable que la sensibilité des deux **hydrophones** varie dans une même mesure).

Pendant l'étalonnage, assurer que les niveaux de **signal** restent dans les limites de la plage de linéarité.

NOTE 1 Une déformation peut se produire par la présence d'harmoniques plus élevés dans le **signal**, évidents après un examen des niveaux spectraux. Dans l'idéal, tous les harmoniques sont inférieurs de plus de 10 dB en amplitude à la fondamentale.

NOTE 2 Si l'**hydrophone** de référence étalonné est utilisé dans des conditions d'environnement très différentes de celles utilisées lors de son étalonnage primaire, cela peut provoquer une variation de la sensibilité et ajouter à l'incertitude d'étalonnage. Les conditions d'environnement pertinentes incluent la profondeur d'immersion et la température de l'eau.

9.3.9 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. Avec précaution et en utilisant des **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement principale, une incertitude globale (niveaux de confiance de 95 %) peut être obtenue dans la plage comprise entre 7 % et 15 %.

NOTE L'étalonnage de l'**hydrophone** par une méthode de comparaison présente en général une incertitude plus importante qu'une méthode primaire (comme une méthode reposant sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude de l'étalonnage de l'**hydrophone** de référence introduit inévitablement un facteur d'incertitude de Type B important [43]. Des recommandations supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données à l'Annexe F.

9.4 Étalonnage de l'hydrophone à l'aide d'un projecteur étalonné

9.4.1 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

9.4.2 Distance de séparation

La distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être choisie et mesurée selon les exigences de 5.6.5.

Lors du choix de la distance de séparation, les exigences relatives aux conditions de **champ acoustique libre** (5.2) et aux conditions de **champ acoustique lointain** (5.3) doivent être satisfaites.

Il est recommandé de réaliser chaque étalonnage répété à une distance de séparation différente.

Le **projecteur** peut avoir été étalonné pour une certaine distance ou dans une certaine plage de distances. Si c'est le cas, il est recommandé d'utiliser ces distances de séparation pour l'étalonnage également.

9.4.3 Préparation, montage et alignement du transducteur

Avant de commencer les mesurages, les exigences en matière de trempage (7.1) et de mouillage (7.2) des **transducteurs** doivent être satisfaites.

Pour chaque mesurage de l'impédance électrique de transfert, les exigences relatives au montage du **transducteur** (5.6.3) et à l'alignement du **transducteur** (5.6.4) doivent être satisfaites.

9.4.4 Forme du signal

La forme du **signal** doit être choisie selon 6.1.

Si le **projecteur** a été étalonné avec un **signal** de forme donnée, il est recommandé d'utiliser ce même **signal** lorsque ce **projecteur** constitue une source sonore étalonnée.

9.4.5 Mesurage de l'impédance électrique de transfert

À chaque fréquence acoustique, l'**impédance électrique de transfert** doit être déterminée en mesurant la tension de l'**hydrophone** selon 6.3, et le courant d'attaque du **projecteur** selon 6.4. La tension et le courant doivent être exprimés dans la même métrique (par exemple, grandeurs crêtes ou grandeurs efficaces).

NOTE 1 Pour une plus grande précision, le courant d'attaque du **projecteur** peut être mesuré à travers le même canal de mesure que celui de la tension de l'**hydrophone** (le canal de mesure étant composé d'un amplificateur, d'un filtre et d'un numériseur). Dans ce cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas d'étalonnage absolu, étant donné que seuls les rapports de grandeurs électriques sont exigés.

NOTE 2 Si cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant du **projecteur** avec la tension de l'**hydrophone**. Cela réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Si des fréquences acoustiques très élevées sont utilisées, chaque **impédance électrique de transfert** peut être corrigée de la perte due à l'absorption acoustique par l'eau. De plus amples informations sont données en 5.8.1 et à l'Annexe E.

9.4.6 Calcul des sensibilités de réception

À partir des valeurs mesurées de d , U_{PH} , I_P , et de la sensibilité connue à l'émission en courant $S_{I,P}$ du **projecteur** étalonné, le module de la **sensibilité de réception en champ libre** $|M_H|$ de l'**hydrophone** doit être calculé avec l'équation suivante:

$$|M_H| = \frac{d U_{PH}}{|S_{I,P}| I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{|S_{I,P}|} \quad (22)$$

9.4.7 Répétabilité

L'étalonnage doit être répété plusieurs fois et la moyenne des résultats à chaque fréquence doit être utilisée comme la valeur finale de sensibilité. Les étalonnages répétés doivent être totalement indépendants, les **transducteurs** étant retirés de l'eau et remontés entre chaque étalonnage.

L'écart type doit être déterminé et utilisé dans le calcul des incertitudes (voir l'Annexe F).

Il est recommandé de procéder à au moins quatre mesurages répétés.

NOTE 1 Si une distance de séparation différente est utilisée pour certains des étalonnages répétés, cela facilite l'évaluation de certaines hypothèses de la méthode (conditions de champ libre, champ d'onde sphérique, etc.), étant donné que la sensibilité ne varie pas avec la distance de séparation pour les ondes à propagation sphérique dans les conditions de champ libre (avec les corrections apportées pour l'absorption par l'eau aux fréquences élevées).

NOTE 2 Le manque de bonne répétabilité indique un problème avec l'étalonnage. Cela peut s'expliquer par un mauvais rapport **signal** sur bruit, par la présence de réflexions acoustiques, par un positionnement et un alignement imprécis, par une mauvaise stabilité temporelle des performances des **transducteurs** acoustiques ou des appareils. Il est possible d'obtenir, avec précaution, des écarts types pouvant descendre jusqu'à 1 % pour les **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement.

9.4.8 Vérification et contrôles

Les **signaux** mesurés doivent être vérifiés pour détecter une déformation pendant les étalonnages. En présence d'une déformation significative, le niveau d'entraînement du **projecteur** doit être réduit.

Dans la mesure du possible, le **projecteur** étalonné doit être utilisé de la manière et dans les conditions correspondant à son étalonnage primaire.

L'utilisation d'un **hydrophone** de référence étalonné pour vérifier les performances du **projecteur** limite le risque d'instabilité temporelle dans la sensibilité du **projecteur** depuis son dernier étalonnage primaire.

NOTE 1 Pendant l'étalonnage, assurer que les niveaux de **signal** restent dans les limites de la plage de linéarité. Une déformation peut se produire par la présence d'harmoniques plus élevées dans le **signal**, évidents après un examen des niveaux spectraux. Dans l'idéal, tous les harmoniques sont inférieurs de plus de 10 dB en amplitude à la fondamentale.

NOTE 2 Dans l'idéal, le **projecteur** de référence étalonné est utilisé dans les conditions de fonctionnement correspondant à celles utilisées lors de son étalonnage primaire. Ces conditions incluent une tension d'attaque appliquée, une distance de séparation et une configuration de montage similaires.

NOTE 3 Si le **projecteur** de référence étalonné est utilisé dans des conditions d'environnement très différentes de celles utilisées lors de son étalonnage primaire, cela peut provoquer une variation de la sensibilité et ajouter à l'incertitude d'étalonnage. Les conditions d'environnement pertinentes incluent la profondeur d'immersion et la température de l'eau.

NOTE 4 Pour vérifier la stabilité de la sensibilité du **projecteur** (depuis son dernier étalonnage primaire), un **hydrophone** étalonné peut être utilisé pour mesurer le champ acoustique produit par le **projecteur**.

9.4.9 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. Avec précaution et en utilisant des **hydrophones** dans leur plage de fonctionnement principale, une incertitude globale (niveaux de confiance de 95 %) peut être obtenue dans la plage comprise entre 10 % et 20 %.

NOTE L'étalonnage de l'**hydrophone** à l'aide d'un **projecteur** normalisé présente en général une incertitude plus importante qu'une méthode primaire (comme une méthode reposant sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude de l'étalonnage du **projecteur** de référence introduit inévitablement un facteur d'incertitude important. La stabilité du **projecteur** et le manque éventuel de conditions de champ libre peuvent également contribuer à l'incertitude globale [39]. Des recommandations supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données à l'Annexe F.

9.5 Étalonnage du projecteur à l'aide d'un hydrophone étalonné

9.5.1 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2), aux conditions de champ lointain (5.3) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

9.5.2 Distance de séparation

La distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être choisie et mesurée selon les exigences de 5.6.5.

Lors du choix de la distance de séparation, les exigences relatives aux conditions de **champ acoustique libre** (5.2) et aux conditions de champ acoustique lointain (5.3) doivent être satisfaites.

Il est recommandé de réaliser chaque étalonnage répété à une distance de séparation différente.

9.5.3 Préparation, montage et alignement du transducteur

Avant de commencer les mesurages, les exigences en matière de trempage (7.1) et de mouillage (7.2) des **transducteurs** doivent être satisfaites.

Pour chaque mesurage de l'**impédance électrique de transfert**, les exigences relatives au montage du **transducteur** (5.6.3) et à l'alignement du **transducteur** (5.6.4) doivent être satisfaites.

9.5.4 Forme du signal

La forme du **signal** doit être choisie selon 6.1.

9.5.5 Mesurage de l'impédance électrique de transfert

À chaque fréquence acoustique, l'**impédance électrique de transfert** doit être déterminée en mesurant la tension de l'**hydrophone** selon 6.3, et le courant d'attaque du **projecteur** selon 6.4. La tension et le courant doivent être exprimés dans la même métrique (par exemple, grandeurs crêtes ou grandeurs efficaces).

NOTE 1 Pour une plus grande précision, le courant d'attaque du **projecteur** peut être mesuré à travers le même canal de mesure que celui de la tension de l'**hydrophone** (le canal de mesure étant composé d'un amplificateur, d'un filtre et d'un numériseur). Dans ce cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas d'étalonnage absolu, étant donné que seuls les rapports de grandeurs électriques sont exigés.

NOTE 2 Si cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant du **projecteur** avec la tension de l'**hydrophone**. Cela réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Si des fréquences acoustiques très élevées sont utilisées, chaque **impédance électrique de transfert** peut être corrigée de la perte due à l'absorption acoustique par l'eau. De plus amples informations sont données en 5.8.1 et à l'Annexe E.

9.5.6 Calcul de la sensibilité d'émission

À partir des valeurs mesurées de d , U_{PH} , I_P , et de la sensibilité en champ libre connue $|M_H|$ de l'**hydrophone**, le module de la **réponse à l'émission en courant** $|S_{I,P}|$ du **projecteur** doit être calculé avec l'équation suivante:

$$|S_{I,P}| = \frac{d U_{PH}}{|M_H| I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{|M_H|} \quad (23)$$

Pour l'étalonnage du **projecteur** en ce qui concerne la tension d'attaque électrique mesurée, V_P , le module de la **réponse à l'émission en tension** $|S_{V,P}|$ est calculé comme suit:

$$|S_{V,P}| = \frac{d U_{PH}}{|M_H| V_P} \quad (24)$$

9.5.7 Vérification et contrôles

Les **signaux** mesurés doivent être vérifiés pour détecter une déformation pendant les étalonnages. En présence d'une déformation significative, le niveau d'entraînement du **projecteur** doit être réduit.

Dans la mesure du possible, le **projecteur** doit être étalonné de la manière et dans les conditions correspondant à son utilisation prévue sur le terrain.

L'utilisation de deux **hydrophones** de référence différents pour les batteries de mesures répétées limite le risque d'instabilité temporelle dans la sensibilité de l'**hydrophone** de référence depuis son dernier étalonnage primaire.

Pendant l'étalonnage, assurer que les niveaux de **signal** restent dans les limites de la plage de linéarité. Une déformation peut se produire par la présence d'harmoniques plus élevés dans le **signal**, évidents après un examen des niveaux spectraux. Dans l'idéal, il convient que tous les harmoniques soient inférieurs de plus de 10 dB en amplitude à la fondamentale.

Dans l'idéal, le **projecteur** en essai est étalonné à l'aide d'une tension d'attaque appliquée, une distance de séparation et une configuration de montage similaires à celles de son utilisation prévue sur le terrain.

Si l'**hydrophone** de référence étalonné est utilisé dans des conditions d'environnement très différentes de celles utilisées lors de son étalonnage primaire, cela peut provoquer une variation de la sensibilité et ajouter à l'incertitude d'étalonnage. Les conditions d'environnement pertinentes incluent la profondeur d'immersion, la température de l'eau et la configuration de montage.

Pour limiter la possibilité que l'**hydrophone** de référence ne modifie sa sensibilité depuis son dernier étalonnage absolu, il est recommandé d'utiliser deux **hydrophones** de référence pour les différents étalonnages répétés. Les sensibilités d'émission du **projecteur** sont les mêmes avec l'un ou l'autre des **hydrophones** de référence. Le degré de divergence des résultats donne une indication de la stabilité des deux **hydrophones** de référence (il est très peu probable que la sensibilité des deux **hydrophones** varie dans une même mesure).

9.5.8 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. Avec précaution et en utilisant des **transducteurs** dans leur plage de fonctionnement principale, une incertitude globale (niveaux de confiance de 95 %) peut être obtenue dans la plage comprise entre 10 % et 20 %.

NOTE L'étalonnage d'un **projecteur** présente en général une incertitude plus importante qu'une méthode primaire (comme une méthode reposant sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude de l'étalonnage de l'**hydrophone** de référence introduit inévitablement un facteur d'incertitude important. Le manque éventuel de conditions de champ libre peut également contribuer dans une plus large mesure à l'incertitude globale que pour l'étalonnage de l'**hydrophone**. Des recommandations supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données à l'Annexe F.

10 Consignation des résultats

10.1 Sensibilité

Les résultats pour la sensibilité du **projecteur** ou de l'**hydrophone** doivent être consignés pour chaque fréquence de mesure acoustique.

Les résultats pour chaque **sensibilité de réception en champ libre** d'un **hydrophone** doivent être consignés en unités de volt par pascal (V/Pa)

Les résultats pour la réponse à l'émission en courant (TCR) d'un **projecteur** doivent être consignés en unités de pascal mètre par ampère, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Les résultats pour la réponse à l'émission en tension (TVR) d'un **projecteur** doivent être consignés en unités de pascal mètre par volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

Tous les multiplicateurs admis dans le système de grandeurs et d'unités SI sont acceptables (par exemple, une variante commune de la **sensibilité de réception en champ libre** dans le champ acoustique sous-marin est $\mu\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$).

10.2 Niveau de sensibilité

Les résultats pour la sensibilité du **projecteur** ou de l'**hydrophone** doivent être exprimés comme un niveau et doivent être consignés pour chaque fréquence de mesure acoustique.

Les résultats pour le **niveau de sensibilité de réception en champ libre** d'un **hydrophone** doivent être consignés en unités de décibels, avec une valeur de référence égale à $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

Les résultats pour le niveau de réponse à l'émission en courant d'un **projecteur** doivent être consignés en unités de décibels, avec une valeur de référence égale à $1 \text{ Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Les résultats pour le niveau de réponse à l'émission en tension d'un **projecteur** doivent être consignés en unités de décibels, avec une valeur de référence égale à $1 \text{ Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Il est recommandé d'inclure la sensibilité dans les unités SI à côté du niveau de sensibilité.

10.3 Incertitudes d'étalonnage

L'incertitude d'étalonnage doit être consignée à côté de la sensibilité et doit être exprimée sous la forme d'une incertitude élargie pour un facteur d'élargissement $k = 2$.

L'incertitude doit être évaluée selon le Guide ISO/IEC 98-3 [43]. Voir l'Annexe F pour des recommandations relatives aux sources d'incertitude dans l'étalonnage des **hydrophones** et des **projecteurs**.

NOTE Dans l'idéal, l'incertitude d'étalonnage est exprimée sous la forme d'une incertitude relative en pourcentage.

10.4 Métadonnées auxiliaires

Un étalonnage est uniquement valide à la date d'étalonnage et pour les conditions d'environnement qui existaient lors de l'étalonnage. Si le résultat de l'étalonnage d'un **hydrophone** est consigné, les conditions d'environnement correspondant à cet étalonnage doivent être indiquées, y compris toutes celles qui peuvent avoir un impact sur la sensibilité du dispositif [9], [47] à [51].

Les conditions qui doivent être consignées sont:

- la date de l'étalonnage;
- la température de l'eau;
- la profondeur d'immersion;
- le type de montage ou d'assemblage utilisé;
- la durée de trempage et la procédure de mouillage utilisée;
- l'orientation du **transducteur** par rapport à un axe ou une marque d'alignement;
- la méthode d'alignement (alignement manuel ou acoustique).

NOTE D'autres conditions qu'il peut être nécessaire de consigner sont:

- la pression acoustique maximale dont fait l'objet l'**hydrophone**;
- les distances de séparation utilisées lors de l'étalonnage;
- les tensions et/ou courants d'attaque électriques;
- l'eau (eau douce ou eau de mer);
- toutes les hypothèses formulées en ce qui concerne le dispositif en essai (la position du centre de référence, par exemple).

11 Périodes de réétalonnage

Les **hydrophones** de référence utilisés pour les mesurages absolus doivent être étalonnés périodiquement, afin de maintenir un statut d'étalonnage valable. Une période appropriée entre les étalonnages doit être choisie après avoir pris en considération l'utilisation qui est faite de l'**hydrophone** et la probabilité de détérioration du dispositif.

NOTE 1 Pour les **hydrophones** de référence, qui sont purement utilisés pour l'étalonnage, un réétalonnage annuel est approprié. Lorsque les **hydrophones** sont utilisés sur le terrain et qu'ils peuvent être soumis à un usage abusif, des étalonnages sont généralement réalisés à des intervalles plus rapprochés (voir l'IEC 60500:2017).

NOTE 2 La décision concernant la période de réétalonnage appropriée dépend du risque de modification non contrôlée de la sensibilité de l'**hydrophone** ou du **projecteur**. Si, pendant la période entre les étalonnages primaires complets, d'autres contrôles d'étalonnage sont réalisés sur toute ou partie de la plage de fréquences, la stabilité temporelle peut faire l'objet d'une autre évaluation continue, et la période entre les étalonnages complets peut être étendue. Il peut s'agir, par exemple, d'un **hydrophone** faisant l'objet de contrôles d'étalonnage relatif périodiques par intégration de l'un des **hydrophones** de référence dans les étalonnages de comparaison avec un autre **hydrophone** de référence ou **projecteur** de référence (voir 9.3.8, 9.4.8 et 9.5.7). Un autre exemple serait un **transducteur** utilisé sur une partie de sa plage de fréquences dans une triade pour un étalonnage par réciprocité d'un autre **transducteur** (8.2.9).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

Annexe A (informative)

Réponse directionnelle d'un hydrophone ou d'un projecteur

A.1 Principe général

Il convient que la détermination complète des caractéristiques de performances d'un **hydrophone** ou d'un **projecteur** comporte un mesurage de sa **réponse directionnelle** à des fréquences représentatives situées au-dessus de la plage où il demeure omnidirectionnel (voir l'IEC 60500:2017, Article 6).

Les mesurages exigent d'intégrer une platine rotative dans le cadre du support du **transducteur** ou du système de positionnement, le montage du **transducteur** étant aligné de sorte que le centre de référence du **transducteur** se situe le long de l'axe de rotation. Le **transducteur** en essai (**hydrophone** ou **projecteur**) tourne autour de l'axe et le **signal** reçu est mesuré en fonction de l'angle dans un plan donné [3] à [6].

Dans la pratique, pour des raisons d'efficacité et de fiabilité, le contrôle de la platine de rotation et l'acquisition du **signal** sont automatisés et informatisés.

A.2 Types de mises en œuvre de mesure

Deux méthodes de mise en œuvre de la rotation sont en général possibles:

a) Intervalles de rotation discrets

Dans ce cas, les mesurages sont réalisés à intervalles angulaires discrets, la platine de rotation s'arrêtant selon des incréments angulaires spécifiés pendant que le **signal** de tension reçu est mesuré au niveau de l'**hydrophone** pour chaque angle de rotation connu. Dans l'idéal, cette méthode exige une certaine forme de contrôle du moteur pas-à-pas. Cette méthode présente l'inconvénient d'être chronophage. De plus, des vibrations mécaniques peuvent se produire dans le système de suspension du **transducteur** lorsque le mouvement est arrêté rapidement à la position prédéterminée. Pour éviter ce problème, l'accélération et la décélération du système de positionnement sont réduites afin d'assurer une modification progressive du mouvement, et les mesurages acoustiques sont différés pendant une durée nécessaire pour éliminer complètement les vibrations mécaniques. L'avantage des intervalles de rotation discrets est qu'une mise à l'échelle automatique et un moyennage des **signaux** à chaque angle de rotation peuvent être réalisés, ce qui permet de maintenir la précision en cas de fluctuations importantes du niveau du **signal** reçu (dans les caractères nuls et pour les lobes latéraux de faible amplitude, par exemple). Cela est souhaitable pour des **transducteurs** hautement directionnels pour lesquels la réponse varie énormément.

b) Rotation continue

Dans ce cas, la platine de rotation tourne en permanence, mais très lentement lors des mesurages simultanés du **signal** de tension reçu et de l'angle de rotation. Même si la rotation est lente pour permettre les relevés de la tension et de l'angle, des mesurages à des milliers d'angles peuvent être en général obtenus en quelques minutes. Cette méthode présente l'avantage d'accélérer la vitesse comparée à la méthode discrète. L'inconvénient est qu'aucun moyennage de **signal** ni aucune mise à l'échelle automatique n'est possible, ce qui peut limiter l'incertitude pouvant être obtenue des réponses de **transducteurs** hautement directionnels dont le niveau de **signal** reçu varie énormément avec l'angle, et ce qui peut également donner lieu à un bruit électrique plus important dans les données mesurées. Il convient que le **transducteur** tourne suffisamment lentement pour que l'acquisition du **signal** recueille les variations du niveau de **signal** autour des valeurs nulles dans la réponse. Cette méthode est mieux adaptée aux **transducteurs** qui présentent une **réponse directionnelle** lisse sans valeurs nulles significatives, comme celle qui peut être obtenue par de petits **hydrophones** à des fréquences jusqu'à la résonance.

A.3 Système de coordonnées

Le système de coordonnées angulaires choisi est celui spécifié par l'IEC 60500:2017.

A.4 Exigences du champ acoustique

Pour tous les mesurages, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre (5.2) et aux conditions de régime permanent (5.4) doivent être satisfaites.

Concernant les exigences de champ lointain, lors du mesurage de la **réponse directionnelle** d'un **transducteur**, la distance entre le **projecteur** et l'**hydrophone** doit être supérieure à celle prévue pour un étalonnage sur l'axe. La distance ne doit pas être inférieure à deux fois celle donnée par la Formule (9) ou la Formule (10), selon celle qui est la plus grande (voir 5.3). Voir Annexe D et les références [3], [4], [7] à [9].

A.5 Positionnement et alignement

Les exigences de 5.6 doivent s'appliquer.

A.6 Forme du signal

La forme du **signal** doit être choisie selon 6.1.

A.7 Mesurage de la réponse directionnelle du transducteur

A.7.1 Projecteur

Le **projecteur** en essai et l'**hydrophone** étant déployés dans l'eau, le **projecteur** est entraîné avec un **signal** d'amplitude fixe, et tourné autour d'un axe passant par le centre de référence dans la plage angulaire exigée, les mesurages du **signal** de tension reçu étant réalisés au niveau de l'**hydrophone** pour chaque angle de rotation connu et à la résolution angulaire exigée. La tension de l'**hydrophone** est mesurée selon 6.3.

NOTE 1 Il n'est pas nécessaire que l'**hydrophone** soit étalonné.

NOTE 2 L'angle de zéro degré est en principe choisi comme direction de référence de l'axe principal du **projecteur**.

A.7.2 Hydrophone

Le **projecteur** et l'**hydrophone** en essai étant déployés dans l'eau, le **projecteur** est entraîné avec un **signal** d'amplitude fixe, et l'**hydrophone** tourne autour d'un axe passant par le centre de référence dans la plage angulaire exigée, les mesurages du **signal** de tension reçu étant réalisés au niveau de l'**hydrophone** pour chaque angle de rotation connu et à la résolution angulaire exigée. La tension de l'**hydrophone** est mesurée selon 6.3.

NOTE 1 Il n'est pas nécessaire que le **projecteur** soit étalonné. Toutefois, toute instabilité dans sa sortie au cours des mesurages contribue à l'incertitude de mesure.

NOTE 2 L'angle de zéro degré est en principe choisi comme direction de référence de l'**hydrophone**.

A.8 Calcul du niveau de réponse directionnelle (perte de déviation angulaire)

La **réponse directionnelle** est calculée en normalisant la réponse en fonction de celle obtenue selon un angle de référence donné. Le niveau de **réponse directionnelle** $L_{D\theta}$ exprimé en décibels peut être calculé comme suit:

$$L_{D\theta} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{\theta}(\theta)}{V_{\text{ref}}} \right) \text{ dB} \quad (\text{A.1})$$

où $V_{\theta}(\theta)$ est la matrice de tensions mesurée dans la plage d'angles, θ , et V_{ref} est la tension de référence utilisée pour la normalisation.

NOTE 1 La tension de référence peut être mesurée dans la direction de référence de l'**hydrophone** ou dans celle de l'axe principal du **projecteur**, mais elle est souvent choisie comme étant la valeur maximale de la tension mesurée dans tous les angles. Le choix de la tension de référence est indiqué avec les résultats si elle n'est pas évidente.

NOTE 2 Pour un **projecteur**, le **signal** maximal est souvent obtenu sur ou à proximité de l'axe principal du **transducteur**. Pour un **hydrophone** de petite taille et relativement omnidirectionnel, la direction de référence choisie peut être arbitraire et n'est pas nécessairement celle de la sensibilité maximale.

A.9 Incertitude

Les mêmes grandeurs qui limitent la précision du mesurage de sensibilité ont un impact sur l'incertitude de mesure de la **réponse directionnelle**, mais il existe certaines limites supplémentaires. Une plus grande distance de séparation est en général exigée (voir Annexe F). Pour les **transducteurs** directionnels, il convient que le niveau des réflexions et du bruit soit dans l'idéal inférieur à celui du mesurage de sensibilité sur l'axe principal en raison du faible niveau des **signaux** mesurés aux angles par rapport à l'axe du faisceau principal.

Si le centre de référence ne se trouve pas précisément sur l'axe de rotation, la distance de séparation variable (précession) peut générer des erreurs dans la phase et l'amplitude de la **réponse directionnelle** mesurée.

Pour les **transducteurs** omnidirectionnels présentant de faibles variations en fonction de l'angle, et pour les **transducteurs** directionnels aux angles proches du maximum du faisceau principal, les incertitudes de la **réponse directionnelle** sont en général d'environ 0,5 dB (pour un niveau de confiance de 95 %). Une incertitude supplémentaire de 1 dB pour chaque **perte de déviation angulaire** entre 10 dB et 30 dB peut être prévue.

A.10 Représentation graphique

Une **réponse directionnelle** est en général représentée de manière graphique, soit sous la forme d'un enregistrement polaire à deux dimensions soit sous la forme d'un enregistrement cartésien [3]. Des exemples sont donnés à la Figure A.1.

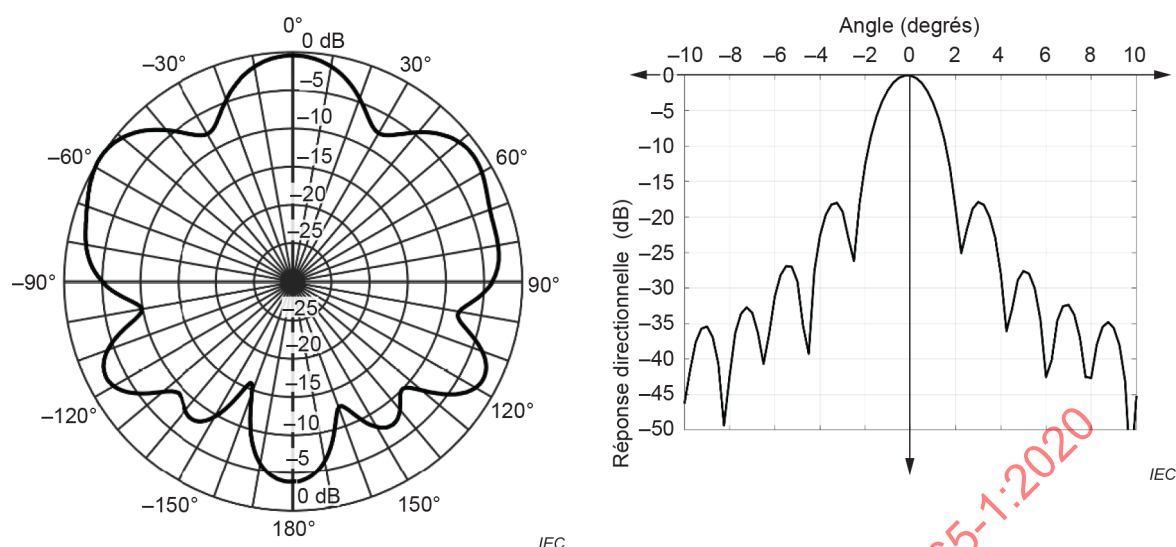


Figure A.1 – Exemples de représentations graphiques du niveau de la réponse directionnelle: enregistrement polaire (à gauche) et enregistrement cartésien (à droite)

Pour les deux enregistrements, l'échelle d'amplitude est le plus souvent en ce qui concerne la **réponse directionnelle** normalisée exprimée en niveau en décibels (**perte de déviation angulaire**). Toutefois, la **réponse directionnelle** normalisée est parfois mise à l'échelle par la sensibilité sur l'axe afin de produire une réponse en tant que sensibilité absolue.

Les exigences de consignation de 10.4 s'appliquent. De plus, chaque enregistrement de **réponse directionnelle** est identifié de manière à indiquer le type de réponses, la fréquence ou la bande de fréquences et l'orientation dans les limites du système de coordonnées spécifié de l'IEC 60500:2017.

NOTE L'échelle angulaire d'un diagramme dans le plan XY est exprimée par rapport à l'angle d'azimut, φ . Le diagramme dans le plan YZ, exprimé par rapport à θ , indique la direction de l'axe Y positif et, de façon analogue en ce qui concerne le diagramme dans le plan XZ, la direction de l'axe X positif est présentée, sauf si le modèle dans le plan XY est omnidirectionnel, c'est-à-dire circulaire.

A.11 Facteur de directivité

Le facteur de **directivité** R_θ peut être exprimé comme suit:

$$R_\theta = \frac{4\pi d^2 p_a^2}{\int p^2(\theta, \varphi) dS} = 4\pi \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{p(\theta, \varphi)}{p_a} \right]^2 \sin\theta d\theta d\varphi \right\}^{-1} \quad (\text{A.2})$$

où

$p(\theta, \varphi)$ est la pression acoustique en fonction de la direction à une distance donnée d ;

p_a est la pression acoustique dans la direction de référence pour R_θ à la même distance d ;

d est le rayon de la sphère dont le centre est le centre de référence de l'**hydrophone** (voir 3.25);

dS est l'élément différentiel d'aire sur la surface de la sphère.

La Formule (A.2) se réfère à l'émission du son par le **transducteur**. Pour la réception du son, $p(\theta, \varphi)$ et p_a sont remplacées par la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone**, en fonction de la direction de l'onde sonore incidente.

NOTE 1 Adapté de l'IEC 60050-801:1994, 801-25-67.

NOTE 2 Si les enregistrements polaires indiquent que l'**hydrophone** représente nettement, soit un piston dans un écran acoustique infini, soit une ligne, les valeurs théoriques du facteur de **directivité** peuvent alors être utilisées [52], [53].

A.12 Indice de directivité

L'indice de **directivité** D_i est égal à:

$$D_i = 10 \log_{10} R_\theta \text{ dB} \quad (\text{A.3})$$

NOTE Voir l'IEC 60050-801:1994, 801-25-68. Pour les formules, tableaux et graphiques de D_i concernant quelques types d'**hydrophones**, voir [4], [52] et [53].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-1:2020

Annexe B (informative)

Mesurage de l'impédance électrique des hydrophones et des projecteurs

B.1 Principes généraux

L'impédance électrique d'un **transducteur électroacoustique** avec élément piézoélectrique dépend de plusieurs facteurs [3], [4], [6]:

- une impédance purement électrique (souvent appelée impédance bloquée), qui est représentative des caractéristiques purement électriques et représente l'impédance lorsque la surface rayonnante du **transducteur** ne se déplace pas. Elle est composée d'une capacité (capacité bloquée), mais peut également être composée d'une résistance de fuites, donnant lieu à des pertes diélectriques.
- une impédance cinétique composée:
 - d'une impédance mécanique résultant du mouvement vibratoire de la surface rayonnante du **projecteur**. La masse, la rigidité et l'humectation de l'élément actif se comportent comme une impédance électrique en raison du couplage dû aux effets piézoélectriques.
 - une impédance de rayonnement acoustique provenant de l'influence du milieu environnant sur le **transducteur**.

L'impédance électrique varie avec la fréquence et dépend de la charge acoustique sur la surface rayonnante du **projecteur**. Par exemple, l'impédance électrique varie selon que le **projecteur** est rayonnant dans l'eau ou dans l'air. La valeur de l'impédance électrique d'un **projecteur** rayonnant dans l'eau dépend des conditions aux limites: les ondes acoustiques réfléchies par les parois de la cuve sont susceptibles de modifier l'impédance électrique.

Une connaissance de l'impédance électrique d'un **transducteur** permet à l'utilisateur:

- de prendre connaissance des caractéristiques de fonctionnement du **transducteur** (fréquence de résonance et facteur de surtension, par exemple);
- de mettre en correspondance l'impédance d'un **projecteur** avec un amplificateur de puissance utilisant un réseau d'adaptation électrique (pour le transfert de puissance maximal);
- de calculer le rendement électroacoustique du **projecteur**;
- de diagnostiquer les défauts de fonctionnement du **projecteur** (un dysfonctionnement du **transducteur** se manifeste souvent dans les caractéristiques d'impédance électrique);
- de corriger une charge électrique par des amplificateurs ou des câbles prolongateurs.

B.2 Mesurage de l'impédance électrique

L'impédance électrique d'un dispositif peut être mesurée en appliquant un **signal** électrique sinusoïdal à la fréquence correspondante aux bornes du **transducteur**, puis en mesurant la tension électrique aux bornes et le courant électrique circulant dans le **transducteur**. Le rapport des modules de la tension et du courant est égal au module de l'impédance, et la différence de phase entre eux est l'angle de phase de l'impédance.

Dans l'équation, l'impédance complexe $\underline{Z}$ est donnée par:

$$\underline{Z} = Z_0 \exp^{j\theta_Z} = \frac{V_0 \exp^{j\theta_V}}{I_0 \exp^{j\theta_I}} = \frac{V_0}{I_0} \exp^{j(\theta_V - \theta_I)} \quad (\text{B.1})$$

Le module et la phase de l'impédance sont donnés par:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (\text{B.2})$$

et

$$\theta_Z = \theta_V - \theta_I \quad (\text{B.3})$$

L'impédance du **transducteur** peut être déterminée en mesurant la tension appliquée à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un numériseur, et en utilisant le même instrument pour mesurer la tension correspondant au courant électrique (le courant étant mesuré à l'aide d'un transformateur de courant ou d'une petite résistance en série avec le **transducteur**). Toutefois, l'impédance électrique peut également être mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance automatique. L'appareil balaye la plage de fréquences à l'étude et mesure l'impédance électrique en appliquant un **signal** à ondes entretenues basse tension au dispositif en essai. Il convient d'indiquer les conditions opérationnelles du **transducteur** (équilibré ou non équilibré) avec les résultats (IEC 60500:2017).

Lors du mesurage de l'impédance, il convient de plonger le **transducteur** dans l'eau, dans les conditions de champ acoustique libre (voir 5.2). Cela signifie qu'il convient que les effets des réflexions aux limites soient négligeables pendant les mesurages. L'utilisation de **signaux** continus dans de petites cuves d'essai peut donner lieu à des **signaux** réfléchis au niveau du **transducteur**, qui modifient l'impédance électrique à travers le composant d'impédance de rayonnement de l'impédance électrique. Cela n'a d'importance qu'aux fréquences proches de la résonance, et se manifeste sous la forme de petites perturbations et oscillations des valeurs d'impédance au fur et à mesure que la fréquence varie. Si ce problème est important, il convient d'utiliser des **signaux** à salves d'impulsions et les techniques de portillonnage temporel pour obtenir les conditions de champ libre (voir 5.2 et Annexe E).

B.3 Déduction des autres paramètres d'impédance électrique

Les composantes réelles et imaginaires de l'impédance sont parfois appelées résistance R et réactance X . Elles sont présentées en [3], [4], [6]:

$$R = Z_0 \cos \theta_Z \quad (\text{B.4})$$

et

$$X = Z_0 \sin \theta_Z \quad (\text{B.5})$$

De même, l'admittance électrique, $\underline{Y}$, et l'impédance électrique sont liées par:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad (\text{B.6})$$

La conductance, G , et la susceptance, B , peuvent être obtenues comme suit:

$$G = Y_0 \cos \theta_Y \quad (\text{B.7})$$

et

$$B = Y_0 \sin \theta_Y \quad (\text{B.8})$$

La conductance, la susceptance, la résistance et la réactance sont liées par:

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} \quad (\text{B.9})$$

et

$$X = \frac{-B}{G^2 + B^2} \quad (\text{B.10})$$

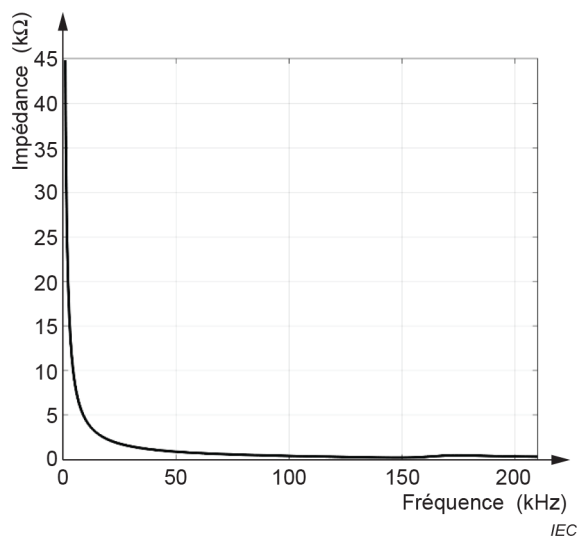
B.4 Représentation graphique

L'impédance et l'admittance peuvent être tracées dans un graphique par rapport à la fréquence pour observer les tendances avec la fréquence [3], [4], [6]. Dans la région de la résonance du **transducteur**, la conductance est perçue comme atteignant un maximum, une inflexion apparaissant dans la courbe de susceptance.

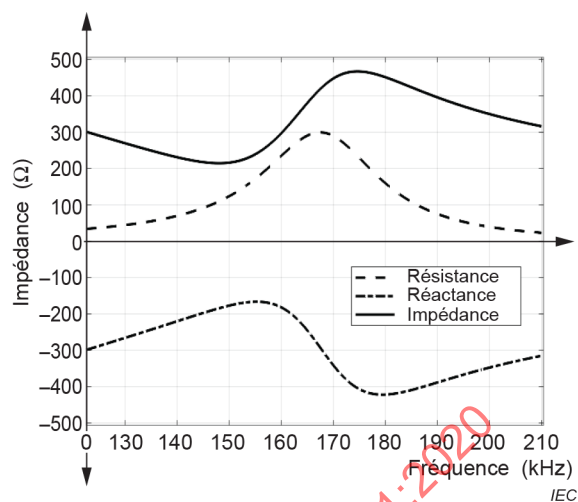
Il est également fréquent de tracer les composantes réelles et imaginaires de l'impédance ou de l'admittance de manière paramétrique, les unes par rapport aux autres au fur et à mesure de la variation de la fréquence. Au fur et à mesure que la fréquence s'approche de la fréquence de résonance, la courbe trace une boucle, parfois appelée boucle d'admittance. Des exemples de tracés de l'impédance électrique du transducteur pour un petit hydrophone sphérique de capacité 3 nF sont présentés à la Figure B.1.

Le facteur de surtension du transducteur (Q) est en général mesuré à partir des données d'impédance électrique, qui est l'inverse de la largeur de bande relative à la résonance. Si la largeur de bande à la résonance, Δf , est calculée comme étant la différence des deux valeurs de fréquence lorsque la conductance électrique est égale à la moitié de la valeur de conductance à la résonance, et si f_R est la fréquence de résonance, Q peut être calculé comme suit:

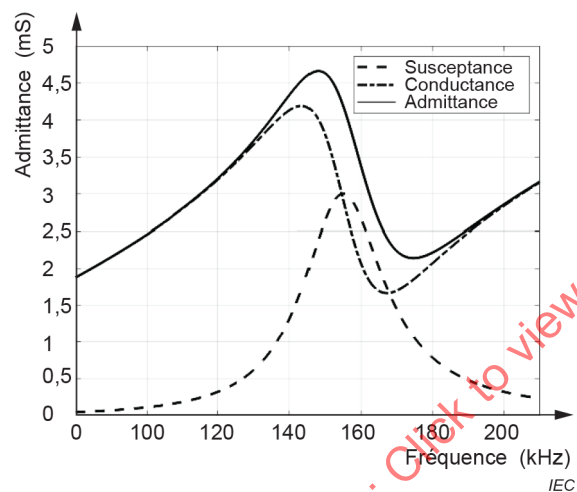
$$Q = \frac{f_R}{\Delta f} \quad (\text{B.11})$$



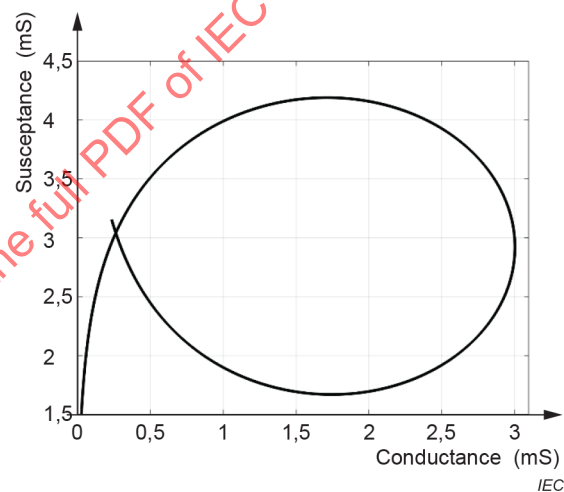
a) Module d'impédance électrique



b) Module d'impédance et résistance et réactance proches de la fréquence de résonance de 240 kHz



c) Module d'admittance et conductance et susceptance proches de la fréquence de résonance



d) Tracé de la boucle d'admittance

Figure B.1 – Exemples de tracés de l'impédance électrique du transducteur pour un petit hydrophone sphérique de capacité 3 nF

Annexe C (informative)

Calcul des corrections de la charge électrique

C.1 Corrections de la charge électrique

La sensibilité d'un **hydrophone** est souvent spécifiée comme la sensibilité en circuit ouvert à l'extrémité du câble. Il s'agit de la sensibilité de l'**hydrophone** à l'extrémité de son câble, lorsqu'il n'est pas connecté à une charge électrique. Lorsqu'une charge électrique spécifique, comme un oscilloscope, un amplificateur ou un câble supplémentaire, est utilisée à la sortie de l'**hydrophone**, la sensibilité chargée de l'**hydrophone** peut être liée à la sensibilité en circuit ouvert.

C.2 Corrections de la charge de l'amplificateur utilisant l'impédance électrique complexe

Prendre en considération le cas général dans lequel l'**hydrophone** est considéré comme un réseau à deux bornes d'impédance électrique complexe Z_H , relié à une charge électrique d'impédance électrique complexe, Z_L . La sensibilité chargée à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**, M_L , lorsqu'il est relié à la charge spécifiée, est liée à la sensibilité en circuit ouvert à l'extrémité du câble, M_0 , selon [2]:

$$|M_L| = |M_0| \sqrt{\frac{Re(Z_L)^2 + Im(Z_L)^2}{[Re(Z_L) + Re(Z_H)]^2 + [Im(Z_L) + Im(Z_H)]^2}} \quad (C.1)$$

où $Re()$ et $Im()$ indiquent les parties réelles et imaginaires de l'impédance électrique complexe correspondante.

Par hypothèse, la charge électrique peut souvent être une combinaison parallèle d'une résistance R_L et d'une capacité C_L . Dans ce cas, $Re()$ et $Im()$ sont donnés par:

$$Re(Z_L) = \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (C.2)$$

et

$$Im(Z_L) = \frac{-\omega C_L R_L^2}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (C.3)$$

où ω est la fréquence angulaire.

C.3 Corrections de la charge provoquée par des câbles prolongateurs (utilisant l'impédance électrique complexe)

Pour les **hydrophones** sans préamplificateur intégré, les mesurages de l'impédance complexe et de la sensibilité réalisés à l'extrémité d'un câble prolongateur peuvent être corrigés à l'aide des Formules (C.4) et (C.5). Ces formules exigent de ne mesurer que l'impédance complexe de l'**hydrophone** avec le câble prolongateur, et le câble prolongateur seul afin de déterminer

l'impédance complexe et la sensibilité en circuit ouvert de l'**hydrophone** à l'extrémité du câble de l'**hydrophone** intégré [3], [23].

Dans le cadre d'un fonctionnement à basses fréquences RF (centaines de kilohertz ou plus), un câble prolongateur ajouté peut être considéré comme un réseau électrique à deux accès [16]. Pour décrire de manière exhaustive le comportement électrique, l'impédance en circuit ouvert et l'impédance de court-circuit doivent être utilisées. Dans ce cas, l'impédance complexe de l'**hydrophone** $\underline{Z}_H$ est donnée par:

$$\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{oc} (\underline{Z}'_H - \underline{Z}_{sc})}{\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}'_H} \quad (C.4)$$

où $\underline{Z}'_H$ est l'impédance complexe de l'**hydrophone** et du câble prolongateur, $\underline{Z}_{oc}$ l'impédance complexe du câble prolongateur seul mesurée avec le circuit ouvert à extrémité libre, $\underline{Z}_{sc}$ l'impédance complexe du câble prolongateur seul mesurée avec les extrémités libres court-circuitées.

La sensibilité en circuit ouvert de l'**hydrophone** à l'extrémité du câble d'**hydrophone** intégré, $\underline{M}_0$, peut être déduite de la sensibilité en circuit ouvert à l'extrémité du câble prolongateur, $\underline{M}_c$, comme suit [23]:

$$|\underline{M}_0| = \frac{\sqrt{|\underline{Z}_{oc} (\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}_{sc})|}}{|\underline{Z}_{oc} - \underline{Z}'_H|} |\underline{M}_c| \quad (C.5)$$

À l'aide de la Formule (C.4), l'impédance électrique complexe de l'**hydrophone** peut être déduite des mesurages d'impédance de l'**hydrophone** avec le câble prolongateur ajouté et le câble prolongateur seul, tant dans les configurations ouvertes qu'en court-circuit. De même, à partir de ces mêmes mesurages d'impédance et d'un mesurage de la sensibilité en circuit ouvert de l'**hydrophone** avec le câble prolongateur ajouté, la Formule (C.5) permet de déduire la sensibilité en circuit ouvert de l'**hydrophone** seul (à l'extrémité de son câble intégré).

À l'inverse des **hydrophones** soumis à l'essai avec des longueurs de câble supplémentaires, les facteurs de correction ne sont en général pas calculés ni utilisés pour émettre les réponses des **transducteurs** obtenues avec les câbles prolongateurs.

C.4 Corrections utilisant uniquement des capacités

Une autre simplification est possible si les impédances électriques de l'**hydrophone** et de la charge peuvent être par hypothèse capacitives. Il s'agit d'une hypothèse valable pour un **hydrophone** uniquement à des fréquences bien inférieures à la fréquence de résonance, et pour les charges telles que des câbles prolongateurs, à des fréquences basses. Dans ce cas, si C_H est la capacité à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**, y compris tous les câbles et connecteurs intégrés, et C_L de nouveau la capacité de la charge, la correction se réduit à [2], [23]:

$$\underline{M}_L = \underline{M}_0 \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (C.6)$$