

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones –
Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration**

**Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones –
Partie 2: Procédures pour l'étalonnage à basse pression de fréquence**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2019 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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 2: Procedures for low frequency pressure calibration**

**Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones –
Partie 2: Procédures pour l'étalonnage à basse pression de fréquence**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8322-7346-3

**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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 Symbols	12
5 Procedures for calibration.....	13
5.1 Principles.....	13
5.2 Field limitations.....	14
5.3 Schematic survey of procedures	14
5.4 Reporting of results.....	14
5.5 Recalibration periods	15
5.6 Temperature and pressure considerations for calibration	15
5.7 Preparation of transducers.....	15
6 Electrical measurements.....	15
6.1 Signal type.....	15
6.2 Earthing.....	15
6.3 Measurement of hydrophone output voltage.....	15
6.3.1 General	15
6.3.2 Electrical loading by measuring instrument.....	15
6.3.3 Electrical loading by extension cable	16
6.3.4 Cross-talk and acoustic interference	16
6.3.5 Integral pre-amplifier	16
6.4 Measurement of projector current	16
7 Calibration by hydrostatic excitation	16
7.1 General.....	16
7.2 Principle	16
7.2.1 Determination of the alternating pressure	16
7.2.2 Determination of the correction factor	18
7.2.3 Determination of the equivalent height.....	18
7.2.4 Calculation of the pressure sensitivity of hydrophone.....	20
7.3 Design of vibration system	20
7.4 Alternative method for hydrostatic excitation	20
7.5 Uncertainty	21
8 Calibration by piezoelectric compensation	21
8.1 General.....	21
8.2 Principle	21
8.2.1 Determination of the sound pressure	21
8.2.2 Determination of the characteristic constant	22
8.2.3 Calculation of the pressure sensitivity of hydrophone.....	23
8.3 Design of the calibration chamber.....	23
8.3.1 General	23
8.3.2 Low frequency chamber.....	23
8.3.3 High frequency chamber	23
8.4 Practical limitations of the piezoelectric compensation method	24
8.5 Relative calibration method.....	24

8.6	Uncertainty	25
9	Calibration by acoustic coupler reciprocity	25
9.1	General	25
9.2	Principle	25
9.2.1	Theory of acoustic coupler reciprocity	25
9.2.2	Procedures for the reciprocity calibration	26
9.2.3	Calculation of transfer impedance	27
9.2.4	Determination of acoustic compliance	27
9.3	Limitation of acoustic coupler reciprocity	27
9.3.1	Frequency limit	27
9.3.2	Hydrophone limit	28
9.4	Measurement	28
9.4.1	General	28
9.4.2	Evidence of interference effects	28
9.4.3	Reciprocity verification	28
9.4.4	Linearity verification	29
9.5	Uncertainty	29
10	Calibration by pistonphone	29
10.1	General	29
10.2	Principle	29
10.2.1	Determination of the sound pressure	29
10.2.2	Determination of the compliance of the medium	30
10.2.3	Calculation of the pressure sensitivity	30
10.3	Limitations	30
10.4	Relative calibration	31
10.4.1	Comparison with a reference transducer	31
10.4.2	Comparison using air–water pistonphone	31
10.5	Uncertainty	32
11	Calibration by vibrating column	32
11.1	General	32
11.2	Principle	32
11.2.1	General	32
11.2.2	Expression for the pressure	33
11.2.3	Determination of the sensitivity	34
11.3	Conditions of measurement	35
11.3.1	Mechanical	35
11.3.2	Acoustical	36
11.4	Relative calibration method	36
11.5	Uncertainty	37
12	Calibration by static pressure transducer	37
12.1	General	37
12.2	Principle	38
12.2.1	Theory of static pressure calibration	38
12.2.2	Determination of the sensitivity of static pressure transducer	38
12.2.3	Calculation of the pressure sensitivity	39
12.3	Limitations	39
12.4	Uncertainty	39
Annex A (informative)	Advanced acoustic coupler calibration methods	40

A.1	General.....	40
A.2	Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers and a hydrophone to be calibrated.....	41
A.2.1	General	41
A.2.2	Theory	42
A.3	Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers, a hydrophone to be calibrated, and a sound source	43
A.3.1	General	43
A.3.2	Theory	44
A.4	Acoustic-coupler calibration using a coupler, a reciprocal transducer, a projector, a hydrophone to be calibrated, and a subsidiary body of known compliance	45
A.4.1	General	45
A.4.2	Theory	45
Annex B (informative)	Assessment of uncertainty in the low frequency pressure calibration of hydrophone	48
B.1	General.....	48
B.2	Type A evaluation of uncertainty	48
B.3	Type B evaluation of uncertainty	48
B.4	Reported uncertainty.....	48
B.5	Common sources of uncertainty	49
Bibliography.....		51
Figure 1	– Diagram of calibration by hydrostatic excitation.....	17
Figure 2	– Schematic drawing of calibration by piezoelectric compensation	22
Figure 3	– Diagram of the chamber for high frequency	24
Figure 4	– Reciprocity coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated	26
Figure 5	– Comparison calibration using pistonphone with calibrated hydrophone.....	32
Figure 6	– Diagram of calibration by vibrating column	33
Figure 7	– Diagram of calibration by vibrating column using comparison	37
Figure 8	–Diagram of comparison calibration using static pressure transducer.....	38
Figure A.1	– Reference coupler with two transducers: a projector P and a reciprocal transducer T	42
Figure A.2	– Auxiliary coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T and a hydrophone H to be calibrated	42
Figure A.3	– Auxiliary coupler with four transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, a sound source S and a hydrophone H to be calibrated	44
Figure A.4	– Schematic drawing of the measuring system.....	46

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES –
CALIBRATION OF HYDROPHONES –****Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration**

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 60565-2 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics.

This first edition of IEC 60565-2, together with IEC 60565-1, 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) IEC 60565 has been divided into two parts:
 - Part 1: Procedures for free-field calibration;
 - Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration (this document).
- 2) A relative calibration method has been added to Clause 8: Calibration by piezoelectric compensation.

- 3) A relative calibration method has been added to Clause 11: Calibration by **vibrating column**.
- 4) Clause 12: Calibration by static pressure transducer, has been added.
- 5) Annex A: Equivalent circuit of the excitation system for calibration with a **vibrating column**, has been deleted.
- 6) Subclauses 9.6, 9.7 and 9.8 have been moved to form a new Annex A: Advanced acoustic coupler calibration methods.

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

FDIS	Report on voting
87/720/FDIS	87/723/RVD

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

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

NOTE Words in **bold** in the text are terms 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-2:2019

INTRODUCTION

The purpose of this document is to establish the procedures for low frequency pressure calibrations of **hydrophones** in the frequency range from 0,01 Hz to several kilohertz.

To ensure the correctness of the calibrations, the **hydrophones** to be calibrated are "rigid" **hydrophones** with small size compared to the acoustic wavelength, and are not sensitive to vibration when calibrated.

Principles, procedures, and **uncertainties** of physical calibrations such as hydrostatic excitation, piezoelectric compensation, **pistonphone**, **vibrating column**, static pressure transducer, etc., and reciprocity calibrations in acoustic **couplers** are given in this document. Calibrations are carried out using one of these methods, depending on the different principles to be used, and its limitations to the sound field and the frequency range.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-2:2019

UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES – CALIBRATION OF HYDROPHONES –

Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration

1 Scope

This part of IEC 60565 specifies the methods for low frequency pressure calibration of **hydrophones** at frequencies from 0,01 Hz to several kilohertz depending on calibration method.

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

coupler

apparatus comprising a rigid fluid-filled chamber into which transducers and **hydrophones** can be inserted whose largest dimension is small compared to the wavelength

Note 1 to entry: In this document, the term small chamber is used interchangeably with **coupler**.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1]¹, 3.3, modified – In the definition, "small dimensions" has been replaced by "whose largest dimension is small compared to the wavelength".]

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

3.2

diffraction factor

ratio of the root-mean-square value of the sound pressure, averaged over the part of the **hydrophone** designed to receive an incident plane wave sound pressure from a given direction to the free-field root-mean-square sound pressure that would exist at the position of the reference centre of the **hydrophone** if the **hydrophone** was removed

Note 1 to entry: Spatial average is undertaken first and then time average.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.3, modified – In the definition, "the root-mean-square sound pressure" has been replaced by "the root-mean-square value of the sound pressure," and "the position of" has been added after "that would exist at".]

3.3

electrical transfer impedance

Z_{PH}

<of a transducer pair in a coupler> quotient of the Fourier transform of the open circuit voltage $\mathfrak{Z}(U_H(t))$ across the **hydrophone** electrical terminals, to the Fourier transform of the electrical current $\mathfrak{Z}(I_P(t))$ through the **projector**, when **projector** and **hydrophone** are mounted in a **coupler**

$$Z_{PH} = \frac{\mathfrak{Z}(U_H(t))}{\mathfrak{Z}(I_P(t))} \quad (1)$$

Note 1 to entry: The **electrical transfer impedance** is a complex-valued parameter. The modulus of the **electrical transfer impedance** is expressed in ohm, Ω . The phase angle is expressed in degrees, and represents the phase difference between the **hydrophone** voltage and the **projector** current.

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 and the electrical terminals where the electrical impedance is measured, are specified.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.10, modified – In the term, "transducer pair" has been deleted. The domain "<of a transducer pair in a coupler>" has been added. In the definition, "complex ratio of the open circuit instantaneous voltage U_H " has been replaced by "quotient of the Fourier transform of the open circuit voltage $\mathfrak{Z}(U_H(t))$ ", "the instantaneous current I_P " has been replaced by "Fourier transform of the electrical current $\mathfrak{Z}(I_P(t))$ ", and "if **projector** and **hydrophone** are mounted in a free field with their principal axes in line and directed towards each other" has been replaced by "when **projector** and **hydrophone** are mounted in a **coupler**".]

3.4

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** can 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, "electrical **signals**" has been replaced by "electrical voltages".]

3.5

pistonphone

apparatus having a rigid piston which can be given a reciprocating motion of a known frequency and amplitude to establish a known sound pressure in a closed small chamber

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.20, modified – In the definition, "so permitting the establishment of" has been replaced by "to establish", and "a closed chamber of small dimensions" by "a closed small chamber".]

3.6

pressure sensitivity

$\underline{M}_p$

<of a **hydrophone**> quotient of the Fourier transform of the **hydrophone** open-circuit voltage **signal** $\Im(U_H(t))$ to the Fourier transform of the acoustic pressure **signal** $\Im(p(t))$ averaged over the **hydrophone** active element, at a specified frequency

$$\underline{M}_p = \frac{\Im(U_H(t))}{\Im(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 to entry: The **hydrophone pressure sensitivity** is a complex-valued parameter. The modulus of the **pressure sensitivity** of a **hydrophone** is expressed in units of volt per pascal, V/Pa. The phase angle of the sensitivity is expressed in degrees, and represents the phase difference between the electrical voltage and the sound pressure.

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

Note 3 to entry: The **hydrophone** active element is the electroacoustic element of the **hydrophone** which is sensitive to sound pressure.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.23, modified – In the definition, "ratio of the root-mean-square output voltage" has been replaced by "quotient of the Fourier transform of the **hydrophone** open-circuit output voltage **signal** $\Im(U_H(t))$ ", and "root-mean-square of the sound pressure" has been replaced by "Fourier transform of the sound pressure $\Im(p(t))$ ". The description of the **hydrophone** active element has been moved to a Note to entry.]

3.7

pressure sensitivity level

L_M

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **pressure sensitivity** $|\underline{M}_p|$ to a reference sensitivity of M_{ref} , in decibels

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

Note 1 to entry: The value of reference sensitivity M_{ref} is 1 V/μPa.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.24, modified – In the definition, "modulus of the" has been added before "**pressure sensitivity**", and "in decibels" has been added after " M_{ref} ".]

3.8**projector**

electro-acoustic transducer that converts electric **signals** into sound **signals** propagating in water

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.37]

3.9**ratio of specific heats**

γ

ratio of specific heats under constant pressure and under constant volume

Note 1 to entry: For dry air and temperature 0 °C to 17 °C, $\gamma = 1,40$.

3.10**reciprocal transducer**

linear, passive, and reversible electroacoustic transducer such that the coupling coefficients are equal for transduction in either direction

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.24, modified – In the definition, "transducer" has been replaced by "electroacoustic transducer", and "such that the coupling coefficients are equal for transduction in either direction" has been added at the end of the definition.]

3.11**signal**

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

[SOURCE: ISO 18405:2017 [2], 3.1.5.8]

3.12**transmitting response to current**

$S_{I,T}$

<of a transducer in a coupler> quotient of the Fourier transform of the acoustic pressure **signal** $\Im(p(t))$ to the Fourier transform of the electrical current **signal** $\Im(I(t))$ through a transducer T inserted into the **coupler** at a given frequency

$$S_{I,T} = \frac{\Im(p(t))}{\Im(I(t))} \quad (4)$$

Note 1 to entry: **Transmitting response to current** is expressed in units of pascal per ampere, Pa/A.

Note 2 to entry: Different with the free-field calibration, no distance term is required here.

Note 3 to entry: The acoustic pressure signal is assumed uniform in a **coupler**.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.36, modified – In the term, "small chamber transmitting response to current of a transducer" has been replaced by "**transmitting response to current**". The domain "<of a transducer in a coupler>" has been added. In the definition, "a small chamber" has been replaced by "a **coupler**", and "flowing through the electrical terminals of a transducer inside the chamber" by "through a transducer inserted into the **coupler**". Also, "current" has been replaced by "Fourier transform of the electrical current **signal** $\Im(U_H(t))$ ", and "ratio of the acoustical pressure (assumed uniform)" has been replaced by "quotient of the Fourier transform of the acoustic pressure signal $\Im(p(t))$ ".]

3.13

uncertainty

<of measurement> non-negative parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a measurand, based on the information used

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007 [3], 2.26]

3.14

vibrating column

apparatus in which a column of water in a vertically placed cylindrical container is set in vibration, causing a depth-dependent sound pressure in the water column

Note 1 to entry: The length of the column is sufficiently small compared with the wavelength of the sound in the water. The cross-sectional dimension of the column is small compared with its length.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.38]

3.15

wavenumber

k

reciprocal of the acoustic wavelength multiplied by 2π

$$k = 2\pi / \lambda \quad (5)$$

Note 1 to entry: **Wavenumber** is expressed in units of per metre, 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 given in IEC 60050-103:2009, 103-10-12 is "angular **wavenumber**".

[SOURCE: IEC 60050-726:1982 [4], 726-05-02, modified – In the definition, "the reciprocal of the waveguide wavelength or the" and "for a plane wave" have been deleted, and "acoustic" and "multiplied by 2π " have been added before and after "wavelength", respectively.]

4 Symbols

C_t	acoustic compliance of chamber
C_M	compliance of the medium
c	speed of sound in water
c_f	speed of sound in a fluid
d	depth or distance of the hydrophone
d_{jk}	piezoelectric modulus of the shell material
E	Young's modulus
f	frequency
g	acceleration due to gravity
h	displacement of the water surface in the open vessel
H_e	equivalent height
ΔH	change of the water level
I_P	current through projector
I_T	current through transducer
I_C	compensation current through null projector
K	characteristic constant of piezoelectric null transducer

K_0	hydrostatic pressure correction factor
k	wavenumber
L	length of column or coupler
L_M	pressure sensitivity level of the hydrophone
M_H	sensitivity of the hydrophone
M_p	pressure sensitivity
M_T	sensitivity of the static pressure transducer
M_M	sensitivity of the microphone
p	sound pressure
p_s	static pressure
Q	mechanical quality factor
r	radius of transducer shell
S_P	transmitting response to current of a projector in a coupler
S_T	transmitting response to current of a transducer in a coupler
U_C	compensation voltage
U_H	open-circuit voltage at hydrophone
U_M	open-circuit voltage at microphone
U_{PH}	open-circuit voltage at hydrophone with a projector as sound source
U_{PT}	open-circuit voltage at transducer with a projector as sound source
U_{TH}	open-circuit voltage at hydrophone with a transducer as sound source
U_R	open-circuit voltage at a reference hydrophone
$\underline{u}$	volume velocity
V_b	volume of the subsidiary body
V_t	total volume
ΔV	volume change
x_0	vibration amplitude
Z	contains all the terms involving transfer impedance
$\underline{Z}_{AI}$	acoustic impedance
$\underline{Z}_{PH}$	electrical transfer impedance of projector and hydrophone in a coupler
$\underline{Z}_{PT}$	electrical transfer impedance of projector and transducer in a coupler
$\underline{Z}_{TH}$	electrical transfer impedance of transducer and hydrophone in a coupler
$\underline{Z}_{TP}$	electrical transfer impedance of transducer to projector in a coupler
γ	ratio of specific heats
ρ	density of water
ρ_f	density of fluid
σ	Poisson's modulus
ω	angular frequency
ω_r	resonance angular frequency

5 Procedures for calibration

5.1 Principles

a) Absolute calibration

Calibration without a reference transducer.

b) Relative calibration

Calibration with a calibrated reference transducer.

5.2 Field limitations

The sound fields of calibrations conducted in accordance with Clauses 7 to 12 shall be restricted within a small chamber.

5.3 Schematic survey of procedures

Calibration shall be carried out by one of the following methods, depending on the different principles, with its limitations on the sound field and the frequency range.

- a) Calibration by hydrostatic excitation in accordance with Clause 7 is valid in the frequency range 0,01 Hz to 1 Hz.
- b) Calibration by piezoelectric compensation in accordance with Clause 8 is valid in the frequency range 1,0 Hz to 4 kHz, but with a reference transducer is usually valid in the frequency range 1,0 Hz to 2 kHz.
- c) Calibration by acoustic **coupler** reciprocity in accordance with Clause 9 is valid in the frequency range 0,1 Hz to 5 kHz.
- d) Calibration by **pistonphone** in accordance with Clause 10 with or without a reference transducer is valid in the frequency range from a few hertz to several hundred hertz.
- e) Calibration by **vibrating column** in accordance with Clause 11 with or without a reference transducer is valid in the frequency range 10 Hz to 2 kHz.
- f) Calibration by static pressure transducer in accordance with Clause 12 with a reference transducer is valid in the frequency range 0,5 Hz to 3,15 kHz.

5.4 Reporting of results

Calibration of **pressure sensitivity** or **pressure sensitivity level** is only valid on the date of calibration and for the environmental conditions which existed during the calibration. When the calibration result of a **hydrophone** is reported, the environmental conditions that pertain to that calibration shall be stated, including all those conditions that may influence the sensitivity of the device [5] to [9].

Conditions to be reported may include:

- date of the evaluation;
- water temperature;
- depth of immersion (or applied hydrostatic pressure);
- length of soaking time and any wetting procedure adopted;
- maximum acoustic pressure experienced by the **hydrophone**;
- any assumptions made about the device under test (e.g. the position of the reference centre).

The calibration **uncertainty** shall also be reported alongside the **pressure sensitivity** or **pressure sensitivity level**, which shall be evaluated in accordance with ISO/IEC Guide 98-3 [10].

If use is made of a calibrated **hydrophone** in an environment significantly different than that which existed during calibration, the user may need to increase his assessment of measurement **uncertainties** to account for the change in environment.

5.5 Recalibration periods

Hydrophones shall be calibrated periodically in order to maintain a valid calibration status. For reference **hydrophones**, an annual recalibration may be appropriate. For measuring **hydrophones**, where **hydrophones** are used in the field and potentially may be subjected to abuse, calibration may be required at shorter intervals.

5.6 Temperature and pressure considerations for calibration

Properties of transducers may vary with both ambient temperature and hydrostatic pressure (depth) [6], [7].

Where the sensitivity of a transducer is required for specific conditions of water temperature and hydrostatic pressure (water depth), the transducer shall either be calibrated under the same conditions of temperature and pressure as will be applicable during use of the **hydrophone** in to measure sound fields, or corrections to transducer sensitivity and response values shall be made based on earlier calibrations or validated analytical models.

5.7 Preparation of transducers

To make sure that the transducer is wetted properly, and to ensure that there is no air film or bubbles trapped on its surface, a wetting agent shall be applied to the whole transducer surface. No dry patches shall be visible on the transducer when it is immersed and then removed from the water [8].

6 Electrical measurements

6.1 Signal type

Typically, the excitation waveform used for the calibration is a continuous sinusoidal wave. In this case, a sufficient number of frequencies are chosen to ensure that the **hydrophone** performance is well characterized over the desired frequency range. With the development of the measurement technology, other **signals** are becoming commonplace and these include chirps and broadband noise.

6.2 Earthing

In order to avoid earth loops, the electrical terminals of the transducers shall be kept free from contact with the water. The exposed metal parts of the **hydrophone** shall have a single point earth connection with the cable screen of the **hydrophone**. 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 used for the measurement shall be specified.

When an amplifier, attenuator or filter is used and forms part of the measurement system these elements shall be calibrated.

6.3.2 Electrical loading by measuring instrument

During the measurements, the **hydrophone** shall be connected to a measuring instrument (amplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer) with high electrical input impedance. Typically the electrical input impedance shall be much larger than the electrical impedance of the **hydrophone** (ideally, more than 100 times larger). Where the electrical impedance of the **hydrophone** is high (for example for a small piezoelectric **hydrophone** with low electrical

capacitance), consideration shall be given to the electrical loading of the **hydrophone** caused by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage.

NOTE 1 The corrections can be calculated using the procedure given in IEC 60565-1.

NOTE 2 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.

6.3.3 Electrical loading by extension cable

If an extension cable is attached to the **hydrophone**, this cable will electrically load the **hydrophone** and a correction shall be applied to obtain the open-circuit voltage of the **hydrophone**.

NOTE 1 The corrections at low frequencies are calculated using the procedure given in IEC 60565-1. For high frequency, the corrections can make use of the method developed by Hayman, et al., see [11].

NOTE 2 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.

6.3.4 Cross-talk and acoustic interference

In the presence of interference and cross-talk, **signal** averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement in accuracy. Therefore, efforts shall be made to determine the cause of the problem and steps taken to minimize the effects. Acoustic interference levels that are at least 30 dB lower than the **signal** levels, or at least 40 dB lower than the **signal** levels for continuous wave **signal**, are unlikely to compromise measurement **uncertainty**.

6.3.5 Integral pre-amplifier

When a **hydrophone** has an integral pre-amplifier, the sensitivity is expressed as end-of-cable sensitivity including the performance of the pre-amplifier.

NOTE When a **hydrophone** has an integral pre-amplifier that is matched to the electrical impedance of the measurement system, a correction for electrical loading by extension cables or measuring instruments is unnecessary.

6.4 Measurement of projector current

The current through the **projector** shall be determined either by a calibrated current clamp, calibrated current transformer (producing a voltage proportional to the drive current), or by measuring the voltage drop across a small calibrated resistor (value of only a few ohms) in series with the **projector**.

7 Calibration by hydrostatic excitation

7.1 General

This method of **hydrophone** calibration without a reference transducer applies to the frequency range 0,01 Hz to 1 Hz by harmonically changing hydrostatic pressure. It is an absolute calibration of **hydrophones** and is carried out in a small chamber [12] to [14]. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

7.2 Principle

7.2.1 Determination of the alternating pressure

Connect a closed small chamber to an open vessel such that the water level in the vessel is always higher than the chamber. The open vessel is subject to harmonic movement in the

vertical direction (see Figure 1). The displacement of the water surface in the open vessel h can be expressed as:

$$h = h_0 \cos \omega t \quad (6)$$

where

h_0 is the amplitude of the displacement of the water surface;
 ω is the angular frequency of vibration.

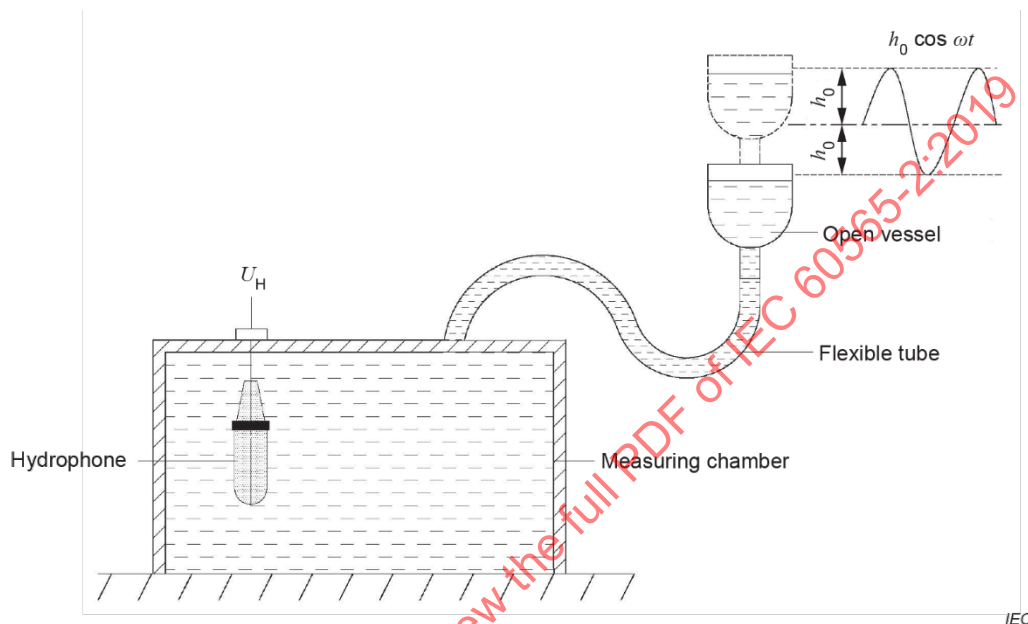


Figure 1 – Diagram of calibration by hydrostatic excitation

The variation of the water level in the open vessel produces an alternating pressure p in the closed chamber:

$$p = p_0 \cos \omega t \quad (7)$$

where

p_0 is the amplitude of the alternating sinusoidal pressure.

NOTE In practice, there is no visible time delay which can be monitored when the open vessel is harmonically moving in the vertical direction.

The alternating pressure p is used as an equivalent pressure to calibrate **hydrophones**. At low frequencies (less than 0,5 Hz), its amplitude is calculated according to the following equation:

$$p_0 = \rho g h_0 \quad (8)$$

where

ρ is the density of water;
 g is the acceleration due to gravity.

At high frequencies, the alternating pressure p is influenced by both the Helmholtz resonance of the system and the inertia of the water in the open vessel and the connecting tube. The

resonance of the system will increase the alternating pressure, and the inertia of the water will reduce the alternating hydrostatic pressure. As a result, the amplitude of the alternating pressure in the measuring chamber is then determined using the following equation:

$$p_0 = \rho g h_0 K_0 \left(1 - \frac{\omega^2}{g} H_e \right) \quad (9)$$

where

K_0 is the pressure correction factor which increases the alternating pressure;

H_e is the equivalent height influenced by the inertia of water in the vessel and tube.

7.2.2 Determination of the correction factor

At very low frequencies, the Helmholtz resonance of the system is described using one-dimensional lumped parameters. The value of the correction factor K_0 shall be calculated by the expression:

$$K_0 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{Q\omega_r} \right)^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right)^2} \quad (10)$$

where

ω_r is the resonance angular frequency of the system;

Q is the mechanical quality factor.

Under conditions of $\omega_r \gg \omega$ and $Q > 2$, Equation (10) can be expressed with sufficient accuracy as:

$$K_0 \approx 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \quad (11)$$

The resonance angular frequency ω_r shall be measured and verified after the calibration system has been constructed. For this purpose, a piezoelectric **projector** is mounted at the bottom of the measuring chamber and driven by a sweep **signal** generator in the frequency range which contains the resonance frequency. A **hydrophone** with constant sensitivity over this frequency range is installed in the chamber and its open-circuit output voltage is measured. The lowest resonance angular frequency of both the **projector** and the **hydrophone** shall be much greater than ω_r . The angular resonance frequency of the system can be determined according to the frequency response of the output voltage of the **hydrophone**.

7.2.3 Determination of the equivalent height

7.2.3.1 General

The equivalent height H_e shall be determined in accordance with 7.2.3.2, 7.2.3.3 or 7.2.3.4 [15].

7.2.3.2 Alternating pressure null method

The alternating pressure in the measuring chamber can be adjusted to zero in two different ways.

- a) By adding or removing water in the open vessel to change the water level, the alternating pressure p in the measuring chamber can be adjusted to zero at a specified angular frequency ω_0 . From Equation (9) the equivalent height is now given by:

$$H_e + \Delta H = \frac{g}{\omega_0^2} \quad (12)$$

where

ΔH is the change of water level.

The water level is changed again by an amount $-\Delta H$ to restore the equivalent height to its original value. The equivalent height is then given by:

$$H_e = \frac{g}{\omega_0^2} - \Delta H \quad (13)$$

- b) While keeping the water level in the open vessel at a suitable height, the alternating pressure in the measuring chamber can be adjusted to zero by varying the frequency. The equivalent height is now equal to g/ω_0^2 , where ω_0 is the angular frequency at which the alternating pressure null occurs. In this method, the water level of the open vessel shall be sufficient to ensure that ω_0 is higher than the upper angular frequency limit of the calibration range. If the water level is changed by an amount $-\Delta H$ to restore the alternating pressure to a suitable value, the equivalent height at this point can be obtained using Equation (13).

7.2.3.3 Water level change method

With the water level in the open vessel at an instantaneous height, H_e , and the open vessel vibrating vertically at an angular frequency ω , measure the open-circuit voltage amplitude U_{H1} of a **hydrophone** in the measuring chamber. Change the water level of the open vessel by an amount ΔH , then measure the open-circuit voltage amplitude of the **hydrophone**, U_{H2} . With these two measurements, the equivalent height shall then be determined according to Equation (14):

$$H_e = \frac{g}{\omega^2} + \frac{U_{H1}\Delta H}{U_{H2} - U_{H1}} \quad (14)$$

The two voltage amplitude U_{H1} and U_{H2} should be measured in a common manner, e.g. both as RMS or both as peak values.

NOTE ΔH is positive when the water level rises and is negative when the water level falls.

7.2.3.4 Two frequencies method

With the open vessel vibrating first at the angular frequency ω_1 and then at the angular frequency ω_2 (ω_1 and ω_2 shall be close to each other, differing by less than 0,6 rad/s), measure the corresponding open-circuit voltages U_{H1} and U_{H2} of the **hydrophone** in the closed chamber. The following assumptions shall be made.

- The sensitivity of the **hydrophone** is almost the same at two close angular frequencies, which are much lower than the resonance angular frequency of the **hydrophone**.
- The **hydrophone** will suffer nearly the same influence of the Helmholtz resonance of the system at two closely spaced angular frequencies. In this case, the equivalent height is given by the expression:

$$H_e = g \frac{U_{H2} - U_{H1}}{U_{H2}\omega_1^2 - U_{H1}\omega_2^2} \quad (15)$$

NOTE The alternating pressure null method is the most accurate of the three methods. However, as this method requires that the frequency for the pressure null be beyond the calibration frequency range, the vibration device needs to operate over a wider frequency range. The two-frequency method is the most convenient one. If the related assumption is satisfied, this method is also very accurate.

7.2.4 Calculation of the pressure sensitivity of hydrophone

The modulus of the **pressure sensitivity** $|M_p|$ of a **hydrophone** placed into the measuring chamber (see Figure 1) in terms of the amplitude of the open-circuit voltage U_{H0} shall be calculated by:

$$|M_p| = \frac{U_{H0}}{p_0} \quad (16)$$

7.3 Design of vibration system

The design of the vibration system shall take into account the following.

- a) As the displacement of the water level h is related to the equivalent pressure p , its amplitude h_0 shall be large enough to produce a sufficiently high equivalent pressure to ensure **signal**-to-noise ratio of measurement. However, to keep the system vibrating smoothly near the upper frequency limit, the vibrating displacement h_0 shall not be too big. In practice, a suitable displacement of vibration is 20 mm.
- b) In practice, the following condition of the Helmholtz resonance angular frequency of the system, $\omega_r \geq 20\omega$, consisting of the vibrating of measuring chamber, soft pipe and open vessel, shall be satisfied, to ensure that

$$K_0 \approx 1 \quad (17)$$

- c) The calibration system shall be designed and installed in such a way that the influence of any stray vibration of the moving device on the open vessel is minimized. All necessary precautions shall be taken to avoid the direct coupling of any vibration.
- d) To ensure uniform motion of the water, the acceleration of the open vessel shall be less than the acceleration due to gravity. This condition can be expressed as:

$$\omega^2 h_0 \ll g \quad (18)$$

NOTE Commercial electrodynamic shaker usually not works at such low frequency and a special vibration system needs to be designed and manufactured. One method is to change rotary motion into vertically harmonic vibration, and stepper motor is usually used for control the rotational velocity accurately. Moreover, to avoid the resonance point of the moving device at low frequency and to keep the open vessel moving smoothly in the vertical direction, a good solution is to use dual stepper motors driven in a differential mode.

7.4 Alternative method for hydrostatic excitation

The hydrostatic pressure can also be varied by changing the depth of the **hydrophone** with simple harmonic motion. In this case, the alternating pressure amplitude p_0 is given by Equation (8) and the modulus of the **pressure sensitivity** $|M_p|$ is calculated from Equation (16).

This method of hydrostatic excitation introduces additional **uncertainty** sources including:

- hydrodynamic flow around the **hydrophone**. This is dependent upon the shape of the **hydrophone**.
- inertial effects of the medium. These can be minimized by proper orientation of the **hydrophone** to reduce the displacement of water near the active face. For example, **hydrophones** with planar active faces can be oriented with the **hydrophone** face in a vertical plane.

- inertial effects within the **hydrophone**. These can also be minimized by orientation although the optimum orientation might not be the same one that minimizes the inertial effects of the medium.
- unwanted turbulence dynamic pressure. This can be minimized by making all fixtures as streamlined as possible. There is also the possibility that the harmonic motion of the **hydrophone** can excite a resonance within the water inside the calibration chamber.

7.5 Uncertainty

It is expected that the overall expanded **uncertainty** of the calibration at frequencies from 0,05 Hz to 0,5 Hz can be less than 0,3 dB (95 % confidence level) with careful practice. However, the **uncertainty** will increase to 0,5 dB (95 % confidence level) at the higher and lower extremes of the frequency range. For the alternative method, it is expected that the overall expanded **uncertainty** of the calibration can be less than 0,7 dB (95 % confidence level) with careful practice [12], [16].

8 Calibration by piezoelectric compensation

8.1 General

This method of **hydrophone** calibration applies to the frequency range 1,0 Hz to 4 kHz by piezoelectric compensation, but the method of **hydrophone** calibration with a reference transducer applies to the frequency range 1,0 Hz to 2 kHz. It is carried out in a small closed water-filled chamber, with its wavelength sufficiently larger than the largest dimension of the chamber [17] to [20]. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

8.2 Principle

8.2.1 Determination of the sound pressure

Place the **hydrophone** inside a closed water-filled tank, equipped with a **projector** and a piezoelectric null transducer, and close to the geometric centre of the null transducer (see Figure 2). The null transducer consists of two coaxially mounted piezoelectric ceramic cylindrical shells. The inner shell acts as driving transducer, while the outer shell serves as displacement sensor. The small annular gap between the shells is filled with an elastic coupling substance. Measure the value of the alternating pressure produced by the **projector** in the tank using the null transducer.

Adjust the phase and amplitude of the voltage U_c at the electrical terminals of the driving shell of the null transducer with respect to the voltage at the **projector** until the output voltage at the outer shell is zero. Use the same **signal** generator feeding the **projector** and the driving shell.

For frequencies higher than 1 kHz, the calibration chamber shall be in accordance with 8.3.2.

When the simultaneous influences of the **projector** and the driving shell of the null transducer neutralize one another, the deformation of the outer shell is zero, the sound pressure near the null transducer is then equal to:

$$p = K(d_{jk}, E, r) U_c \quad (19)$$

where

$K(d_{jk}, E, r)$ is a characteristic constant of the piezoelectric null transducer;

d_{jk} is the piezoelectric modulus of the shell material;

E is the Young's modulus of the shell material;
 r is the mean radius of driving transducer shell;
 U_c is the compensation voltage at the frequency f .

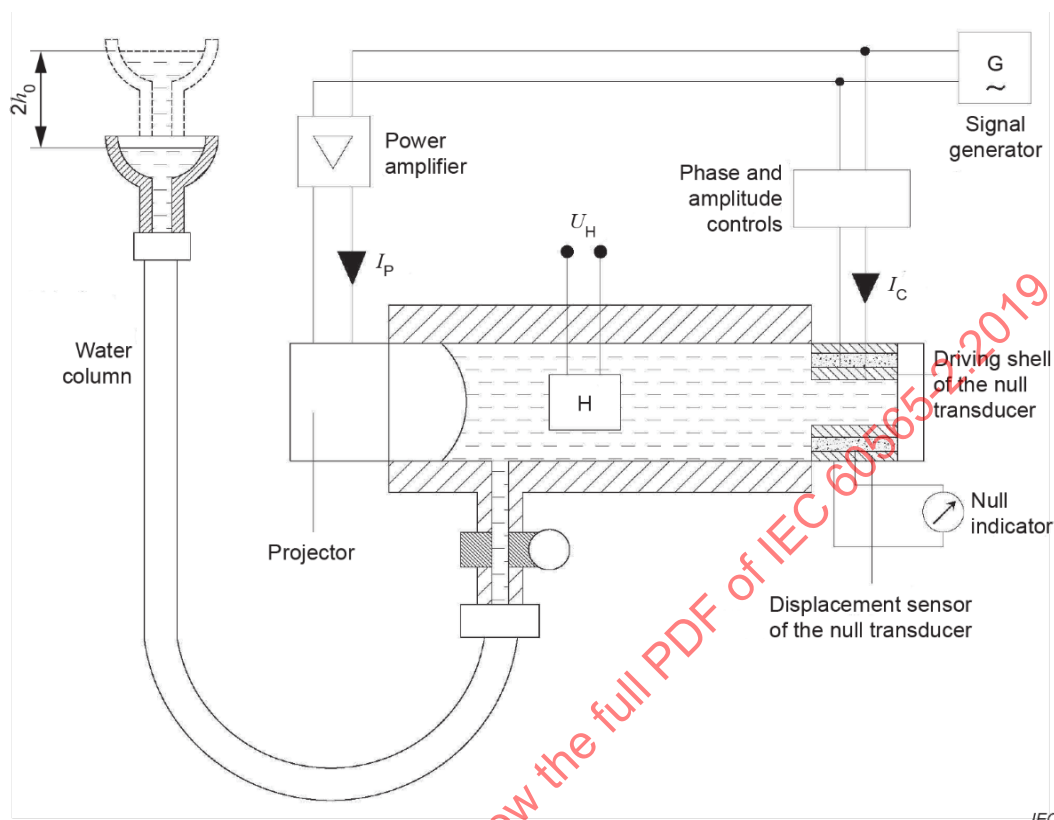


Figure 2 – Schematic drawing of calibration by piezoelectric compensation

8.2.2 Determination of the characteristic constant

The characteristic constant $K(d_{jk}, E, r)$ is generally independent of the frequency. It is determined experimentally by harmonically changing the water level over the null transducer with amplitude h_0 and compensating the resulting deformation of the null transducer by a compensation voltage with an amplitude U_{c0} at the null transducer (see Figure 2). This compensation voltage shall have the same frequency as the oscillation of the water level. It shall be derived either from the oscillator that drives the variation of the water level, or from a pressure sensor that transforms the harmonic displacement of the water level into an alternating voltage.

For this purpose, the cavity of the measuring tank is connected by means of a flexible tube with an open vessel, mounted on a shaker, producing vertical sinusoidal oscillations with a known amplitude. The oscillation frequency shall be low enough (0,3 Hz) to allow the inertial forces arising in the vibrating liquid to be neglected.

The amplitude of the compensation voltage U_{c0} and its phase are adjusted until the displacement of the null transducer is zero.

Then:

$$K(d_{jk}, E, r) = \frac{p_0}{U_{c0}} = \frac{\rho g h_0}{U_{c0}} \quad (20)$$

8.2.3 Calculation of the pressure sensitivity of hydrophone

The modulus of the **pressure sensitivity** $|M_{p,H}|$ of the **hydrophone** H in terms of the open-circuit voltage U_H is equal to:

$$|M_{p,H}| = \frac{U_H U_{c0}}{\rho g h_0 U_c} \quad (21)$$

8.3 Design of the calibration chamber

8.3.1 General

Depending on the frequency range, two types of chamber are used in the piezoelectric compensation method, one for low frequencies and another for high frequencies.

8.3.2 Low frequency chamber

The low frequency chamber shall be constructed from a section of pipe fitted with lids on both ends. A **projector** and null transducer shall be mounted on the lids (see Figure 2). The geometric centres of the transducers shall be located in the same horizontal plane.

The **projector** shall produce a sufficiently high-pressure level that a sufficient **signal**-to-noise ratio is obtained.

The following precautions shall be taken.

- The tank shall be constructed in such a way that entrapped air can readily be removed.
- The acoustic compliance of the tank walls shall be less than the compliance of the water volume.
- Tongue-and-groove or metal gasketing is preferable to more compliant seals.
- The tank shall be designed and the **projector** mounted in such a way that excitation of flexural modes of vibration of the tank walls is minimized.
- All necessary measures are taken to avoid the influence of any vibration of the tank on the null transducer and the **hydrophone**.

In order to control ambient conditions, the tank shall be equipped with facilities for degassing, circulating and pressurizing the water and for controlling its temperature. The **hydrophone** to be measured and the piezoelectric null transducer shall be installed as separate units.

8.3.3 High frequency chamber

The high frequency chamber shall be as shown in Figure 3. The linear dimensions shall be made as small as possible in order to increase the upper frequency limit to above 1 kHz.

The piezoelectric null transducer shall consist of two concentric cylindrical piezoelectric ceramic shells, clamped between two massive flanges. The space between the two cylinders shall be filled with an elastomeric, non-conducting material. The null transducer shall form the cylindrical wall of the chamber; and the measuring cavity of the chamber shall be not larger than the internal volume of the inner shell. The alternating pressure is generated by the **projector**, a piezoelectric ceramic **projector** mounted in the bottom of the chamber. This **projector** shall produce a sufficient high-pressure level to ensure enough excess of the measured **signal** over the noise.

Mount the **hydrophone** on the lid of the chamber. The same precautions shall be taken in the design of the high frequency chamber as those specified in 8.3.2 for the low frequency chamber. Moreover, precautions shall be taken to reduce the influence of the longitudinal deformation of the piezoelectric shells, caused by the transverse piezoelectric effect, on the

output voltage of the deformation sensor. The null transducer and its electrical connections shall be adequately shielded.

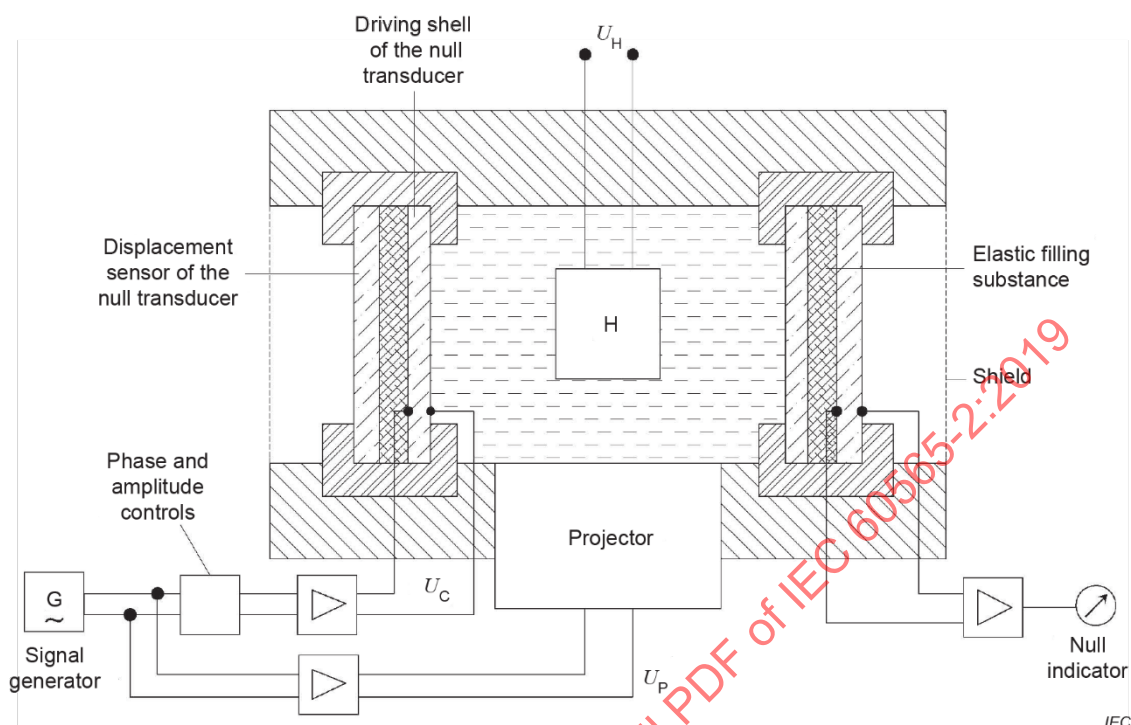


Figure 3 – Diagram of the chamber for high frequency

8.4 Practical limitations of the piezoelectric compensation method

The method shall not be used at frequencies greater than the upper frequency limit, which is imposed by standing waves that can appear in the chamber at frequencies higher than 1 kHz. Standing waves cause a non-uniform pressure distribution in the chamber, so that the output level of the **hydrophone** depends on its position in the chamber.

Irrespective of the construction of the chamber, the system shall not be used at a frequency higher than about two-thirds of the fundamental resonance frequency of the tank cavity.

The method shall not be used at frequencies lower than the low-frequency limit, which is imposed by the loss of sensitivity of the piezoelectric deformation sensor caused by its own leakage resistance and the load resistance of the input of the null indicator.

NOTE 1 By proper design of the chamber, a frequency range from 1 Hz to 4 kHz can be covered by this method.

NOTE 2 If the **hydrophone** is symmetrical, it can be so arranged in the chamber that the planes of the acoustic symmetry of the null transducer and of the **hydrophone** coincide. In this way the influence of standing waves on the calibration result is minimized and the frequency range can be extended [17].

NOTE 3 The plane of acoustic symmetry is the plane at which possible deviations of the sound pressure from the mean value, acting on different parts of the transducer, mutually compensate each other.

NOTE 4 In practice, the plane of the acoustic symmetry of the null transducer coincides with the plane of geometric symmetry. The same is true for a simple omni-directional **hydrophone** if the areas of the active surface on opposite sides of the plane are equal, as well as the local sensitivities of these areas.

8.5 Relative calibration method

In this method, a **projector** is used to produce the sound pressure field in the closed chamber, and a calibrated transducer and the unknown **hydrophone** are simultaneously or alternatively inserted into the chamber, and the applied calibration frequency range is 1 Hz to 2 kHz.

The modulus of the **pressure sensitivity** $|M_{p,H}|$ of the hydrophone to be calibrated shall be calculated from Equation (22):

$$|M_{p,H}| = \frac{U_H}{U_0} |M_{p,R}| \quad (22)$$

where

U_H is the open-circuit voltage at the **hydrophone** to be calibrated;

U_R is the open-circuit voltage at the reference **hydrophone**;

$|M_{p,R}|$ is the modulus of the **pressure sensitivity** of the reference **hydrophone**.

Limitations are in accordance with 8.3. The measurement procedure is convenient and simple. The method is widespread and can be used for calibration in the frequency range from 1 Hz to 2 kHz. If the calibrated transducer and the unknown **hydrophone** are alternatively inserted into the chamber, they shall be identical, otherwise additional sources of **uncertainty** arise because of different conditions in the chamber (change of flexibility, ingress of air bubbles, etc. when the **hydrophones** are reinstalled).

8.6 Uncertainty

If the conditions given in 8.3 are satisfied, the calibration by the piezoelectric compensation method is equivalent to a free-field calibration, with a possible overall expanded **uncertainty** of less than 0,5 dB (95 % confidence levels) with careful practice. At frequencies up to about one-fifth of the lowest resonance frequency of the chamber, the overall expanded **uncertainty** of the calibration can be less than 0,3 dB (95 % confidence levels). For the relative calibration method, it is expected that the overall expanded **uncertainty** can be less than 1,2 dB (95 % confidence levels).

9 Calibration by acoustic coupler reciprocity

9.1 General

This method of **hydrophone** calibration without a reference transducer applies to the frequency range 0,1 Hz to 5 kHz by acoustic **coupler** reciprocity. It is an absolute calibration of **hydrophones** and is carried out in a **coupler** using the reciprocity principle [21] to [23]. This method is suitable for determination of the sensitivities of **hydrophones** depending on the temperature and static pressure. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

9.2 Principle

9.2.1 Theory of acoustic coupler reciprocity

The arrangement of transducers in a **coupler** for reciprocity calibration shall be in accordance with Figure 4. A **reciprocal transducer** T, a linear electro-acoustic sound source P and a **hydrophone** H are mounted in a fluid-filled **coupler**. Measure the modulus of the **electrical transfer impedance** at a number of frequencies throughout the frequency range of interest, when using the **reciprocal transducer** as a **projector** and the **hydrophone** as a receiver, or using the sound source as a **projector** and alternately the **reciprocal transducer** and the **hydrophone** as receivers. From the three transfer impedances measured at each frequency, the **pressure sensitivity** M_p of the **hydrophone** can be calculated.

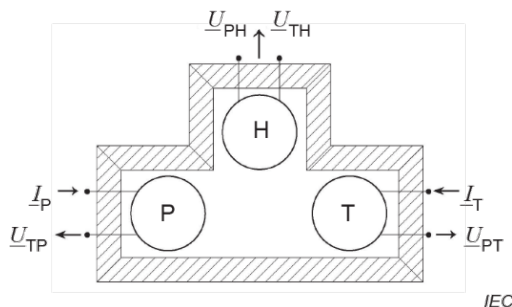


Figure 4 – Reciprocity coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated

9.2.2 Procedures for the reciprocity calibration

The derivation of the equations for the sensitivity of the three devices is given in Clause A.1.

The modulus of the **pressure sensitivity** $|M_{p,H}|$ of the **hydrophone** H is calculated from:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (23)$$

where C_t is the total acoustic compliance of the **coupler** (9.2.4).

The moduli of the **pressure sensitivity** $|M_{p,T}|$ and the **transmitting response to current** $|S_{I,T}|$ of the transducer T are calculated from Equations (24) and (25):

$$|M_{p,T}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (24)$$

$$|S_{I,T}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (25)$$

Similarly, the modulus of the **transmitting response to current** $|S_{I,P}|$ of the **projector** P is given by:

$$|S_{I,P}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (26)$$

NOTE 1 A better statistical accuracy is obtained and the reciprocity 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 **projector** and T as a **hydrophone** and a second time using T as a **projector** and P as a **hydrophone**. Any difference between these two values at the same angular frequency indicates lack of reciprocity or linearity, or can be due to a measuring error. The **uncertainty** of the mean value is in general lower than that of either value alone.

NOTE 2 If the calibration is performed with more than three transducers and if two or more are reciprocal, the **uncertainty** is in general 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.

9.2.3 Calculation of transfer impedance

The **electrical transfer impedance** between a transmitting device (**projector** or **reciprocal transducer**) and a receiving device (**hydrophone** or **reciprocal transducer**) is calculated from the measured values of the current in the transmitting device and voltage in the receiving device (3.3).

For highest accuracy, the current shall be measured through the same measuring channel as the receive voltage (the measuring channel in general consists of an amplifier, filter, digitizer, etc.).

NOTE 1 In the latter case, the instruments used in the measuring channel will not require absolute calibration.

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 Because this impedance depends on the field conditions and the electrical load conditions of the **projector** and the **hydrophone**, these conditions as well as the electrical terminals where the voltage and the current are measured, are specified.

9.2.4 Determination of acoustic compliance

If the **coupler** and the transducers in the **coupler** are rigid and the volume V_f of the fluid in the **coupler** is accurately known, then the acoustic compliance is given by:

$$C_t = \frac{V_f}{\rho_f c_f^2} \quad (27)$$

where

ρ_f is the density of the fluid;

c_f is the speed of sound in the fluid.

For the highest accuracy, the compliances of the **coupler** walls and the transducers in the **coupler** shall be taken into account. Resilient gaskets shall be designed in such a way that they are not exposed to the acoustic field in the **coupler**. The compliances of the active elements of the electro-acoustic transducers in the **coupler** shall either be calculated from published material properties or they shall be measured in the **coupler** using the method developed by McKinney et al. [24].

NOTE For the highest accuracy, the **coupler** wall compliance can be calculated using finite element methods.

Threaded components that support the internal pressure of the **coupler** using coarse, large threads shall be avoided since they do not provide a well-defined boundary condition.

9.3 Limitation of acoustic coupler reciprocity

9.3.1 Frequency limit

9.3.1.1 High-frequency limit

The high-frequency limit is determined by the maximum interior dimension of the **coupler**. When this dimension exceeds one-tenth of the wavelength the acoustic pressure in the **coupler** can no longer be considered uniform and the calibration is no longer valid.

NOTE In some instances, it is possible to calculate the acoustic field within the **coupler** and correct for it, thus, raising the upper frequency limit. At 5 kHz, the maximum dimension for a **coupler** filled with water is 30 mm.

9.3.1.2 Low-frequency limit

The method shall not be used at frequencies below the low-frequency limit for the **coupler**.

NOTE There is no theoretical low-frequency limit. In practice, however, the electrical problems in driving a small piezoelectric **projector** with very high electrical impedance mean that the practical lower limit will be 0,1 Hz for a **coupler** designed for use up to a few hundred hertz. A smaller **coupler** intended for use to higher frequency has low-frequency limits that are correspondingly higher.

9.3.2 Hydrophone limit

The **coupler** shall not be used to calibrate **hydrophones** that are large, directional, or acoustically soft, or to calibrate **hydrophones** near resonance.

Hydrophones that can be calibrated in the reciprocity **coupler** should be able to be mounted in a **coupler** in such a manner that they form a hard acoustic boundary within the **coupler** or their contribution to the compliance of the **coupler** should be known. They should also be designed in such a way that the interior volume of the **coupler** is known when they are mounted in the **coupler**. Few **hydrophones** meet these restrictions. In order to calibrate a more general population of **hydrophones**, process can be extended by using the techniques described in Annex A.

9.4 Measurement

9.4.1 General

Measurement shall be carried out in accordance with 6.3, 6.4, and as follows.

9.4.2 Evidence of interference effects

Interference from electrical cross-talk shall not be present during measurements.

9.4.3 Reciprocity verification

Since the method depends upon the assumption that at least one transducer is reciprocal, this assumption shall be verified. The reciprocity of a pair of **reciprocal transducers** shall be verified by comparison of the **electrical transfer impedance** moduli 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) [12].

NOTE 1 For well-behaved transducers used within their main operating range, it is possible to obtain agreement between the transfer impedances of a few per cent.

NOTE 2 Disagreement of greater than $\pm 5\%$ 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).

Large discrepancies between $|Z_{PT}|$ and $|Z_{TP}|$ can occur if one (or both) transducers are driven too hard, resulting in non-linear behaviour. In this case, reducing the amplitude of the drive **signal** to the transducers will improve the agreement. However, if such a reduction 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** shall be used within their normal operating band (typically up to the frequency of the first resonance for a piezoelectric transducer).

NOTE 3 Use of a transducer at frequencies outside this band (for example, at frequencies much greater than the resonance frequency) can result in non-reciprocal behaviour and degradation in the accuracy of the calibration.

NOTE 4 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 5 If the transducers in the reciprocity verification are identical in construction, they can be nonlinear to the same extent and still appear reciprocal. Therefore, the reciprocity verification is best performed using transducers of different construction before either can be assumed to be reciprocal.

9.4.4 Linearity verification

If there is any doubt regarding the linearity of the transducers, the linearity of each pair of transducers shall be verified by comparison with the moduli of the **electrical transfer impedance** at different levels of the **projector** current, within the dynamic range of the system, at the same frequency. Starting at a level of 20 dB higher than the background noise level up to the highest level that will be used, the modulus of the transfer impedance shall remain constant within $\pm 5\%$.

Care should be taken 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.

9.5 Uncertainty

If the reciprocity, linearity, and high-frequency limit conditions are satisfied as specified in 9.3.1.1, 9.4.3, and 9.4.4, then, the overall expanded **uncertainty** (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 0,5 dB with careful practice.

NOTE 1 The major contributors to the overall **uncertainty** are the **uncertainty** in the compliance of the **coupler** and the field non-uniformity within the **coupler**.

NOTE 2 By including all the contributions to the compliance of the **coupler**, by restricting the maximum frequency of operation to even lower frequencies, and by calculating the effects of the acoustic field non-uniformity, the overall expanded **uncertainty** (95 % confidence levels) of the calibration can be reduced to less than 0,2 dB, see Annex A.

NOTE 3 If a **hydrophone** has a pre-amplifier, it is customary to place only the active element of the **hydrophone** in the **coupler** in order to keep the size of the **coupler** small. If the preamplifier housing of the **hydrophone** scatters sound then the free-field open-circuit sensitivity of the **hydrophone** will differ from the **pressure sensitivity** of the **hydrophone**. This is one possible cause of the **diffraction factor** differing from unity.

10 Calibration by pistonphone

10.1 General

This method of **hydrophone** calibration with or without a reference transducer applies to the frequencies from a few hertz to several hundred hertz by **pistonphone** in a closed chamber. This chamber can be filled with air or partly filled with water [12], [25] to [27]. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

10.2 Principle

10.2.1 Determination of the sound pressure

In a **pistonphone**, the sound pressure is generated in a small closed air-filled chamber by a sinusoidally vibrating piston driven with a continuous wave **signal**. The piston can be driven by an electric motor or moving-coil transducer. The acoustic pressure p in the chamber for a specific circular frequency ω shall be calculated from knowledge of the acoustic impedance, $|Z_{AI}|$, and the volume velocity, $|u|$:

$$p(\omega) = |u| |Z_{AI}| \quad (28)$$

NOTE The sinusoidally varying volume velocity can be written in terms of the derivative of the volume change ΔV .

Calculate the acoustic pressure p in the chamber using Equation (29):

$$p(\omega) = |j\omega\Delta V| \frac{1}{|j\omega C_M|} = \frac{\Delta V}{C_M} \quad (29)$$

where

C_M is the compliance of the medium;

ΔV is the volume change.

Clearly the sound pressure generated is independent of frequency and therefore shall be calculated from knowledge of ΔV and C_M . The change in volume can be determined from the area of the piston and the piston displacement, with the displacement measured using an accelerometer (with the output integrated with respect to time), or using an optical interferometer [26], [27].

10.2.2 Determination of the compliance of the medium

Resonances of the medium and boundaries shall be at frequencies higher than the frequency range of interest and the acoustic impedance shall be purely a compliance.

NOTE 1 The compliance can be taken to be the compliance of only the medium since the compliance of the chamber boundaries and **hydrophone** are generally much smaller than the medium.

The compliance shall be calculated from the gas laws:

$$C_M = \frac{V_t}{\gamma p_s} \quad (30)$$

where

V_t is the total volume;

p_s is the static pressure;

γ is the **ratio of specific heats** for the gas.

NOTE 2 If necessary at very low frequencies, corrections can to be made to C_M , for example, to account for the heat conduction of the chamber walls.

10.2.3 Calculation of the pressure sensitivity

For a **pistonphone** used to obtain an absolute calibration, the modulus of the **pressure sensitivity** $|M_p|$ of the **hydrophone** shall be calculated from the **hydrophone** voltage U_H :

$$|M_p| = \frac{U_H V_t}{\Delta V \gamma p_s} \quad (31)$$

In the calculation, the metrics for the sinusoidal signals for the **hydrophone** voltage and volume velocity must be the same (e.g. both peak amplitude, or both RMS).

10.3 Limitations

The method shall not be used at frequencies greater than the upper limiting frequency caused by non-uniform acoustic pressure in the chamber. For the assumption of uniform pressure to hold, the chamber shall have a largest dimension of no more than one sixteenth of the wavelength (which is equivalent to about 70 mm for an air-filled chamber which operates up to 300 Hz).

NOTE 1 As the frequency increases, the pressure will become non-uniform as wave modes begin to become evident in the chamber. If the chamber is of simple geometry, corrections can be made for these wave modes, but the **uncertainty** of the corrections will increase with frequency. This will in general pose a limit on the upper frequency of operation that will depend on the size of the chamber. For typical chamber sizes, this will be of the order of 300 Hz to 500 Hz.

NOTE 2 Non-uniform pressure will lead to errors in an absolute calibration since the acoustic pressure at the **hydrophone** will then not be that calculated from the piston volume velocity and chamber compliance. In the case of a comparison calibration, the **hydrophone** and reference microphone/**hydrophone** will not experience the same acoustic pressure.

The method shall not be used at frequencies lower than the lower limiting frequency caused by thermal conduction between the air and the chamber walls and air leakage around the piston. These effects are in general negligible for frequencies greater than 5 Hz, but corrections can be made to enable the method to be used at frequencies below 1 Hz [26], [27].

NOTE3 Departure from purely adiabatic conditions can occur at low frequencies due to thermal conduction between the air and the chamber walls. The effect is small in general, but it increases as the frequency decreases. At frequencies greater than 5 Hz, the effect is negligible.

NOTE 4 Air leakage around the piston depends upon the radial clearance between the piston and the bore. If this clearance is of the order of a few hundredths of a millimetre, any effect will be negligible for frequencies greater than 5 Hz.

10.4 Relative calibration

10.4.1 Comparison with a reference transducer

A relative calibration shall be obtained by inserting a calibrated reference transducer into the chamber along with the device under test. Here the **pistonphone** shall be used to provide a stable sound pressure to enable the comparison calibration to take place.

NOTE 1 This has the advantage that the volume change and compliance do not need to be calculated.

The reference device used shall be a calibrated microphone. The modulus of the **pressure sensitivity** $|\underline{M}_p|$ of the **hydrophone** shall be calculated from:

$$|\underline{M}_p| = \frac{U_H}{U_M} |\underline{M}_M| \quad (32)$$

where

U_M is the receive voltage of the microphone;

M_M is the sensitivity of the microphone.

Both the **hydrophone** and the microphone shall be simultaneously inserted into the **coupler** and exposed to the same acoustic pressure rather than using a substitute procedure.

NOTE 2 This ensures that the volume of the **coupler** does not change between measurements.

The chamber dimensions shall be small in comparison to the acoustic wavelength. Under such conditions, and if the chamber is rigidly bounded, the sound pressure can be regarded as constant throughout the chamber at low frequencies.

10.4.2 Comparison using air–water pistonphone

The piston shall be used to drive a small air cavity above the water and the sound pressure shall be the same in both air and water. A microphone shall be used to monitor the pressure in the air cavity. Either a comparison calibration between two **hydrophones** shall be performed or an absolute calibration shall be attempted [12], [28].

NOTE 1 Figure 5 shows a schematic diagram of an air–water **pistonphone** used for a comparison calibration between two **hydrophones**.

NOTE 2 An air–water **pistonphone** has the advantage that due to the greater sound speed (and consequent larger wavelength) in the water medium, the frequency at which the pressure is no longer uniform is increased. If the chamber design is kept simple and symmetric, a uniform acoustic pressure will be achieved over the largest frequency range.

NOTE 3 A completely water-filled **pistonphone** has also been used [13]. However, unlike the case of an air medium, here the compliance of the boundaries will no longer be small compared with that of the water (the **hydrophone** boot, cable and boundary walls can all contribute), requiring the compliance to be measured during each calibration.

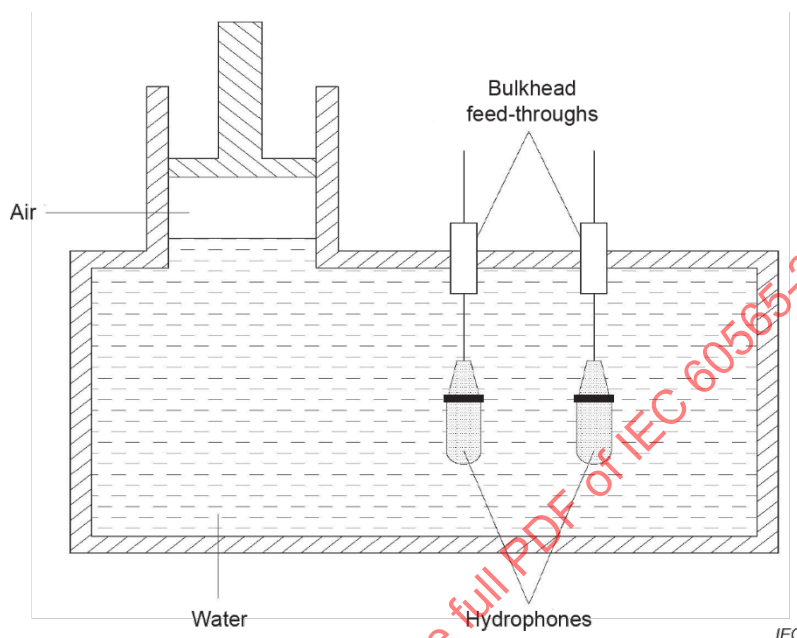


Figure 5 – Comparison calibration using pistonphone with calibrated hydrophone

10.5 Uncertainty

The overall **uncertainty** shall be evaluated and stated with the **hydrophone** sensitivity. If the conditions specified in 10.2 and 10.3 are satisfied, the overall expanded **uncertainty** (95 % confidence levels) of the calibration shall be less than 0,5 dB. For comparison calibration using the **pistonphone**, the **uncertainty** will in general be higher. With good practice it can be less than 1,0 dB (95 % confidence levels).

11 Calibration by vibrating column

11.1 General

This method of **hydrophone** calibration with or without a reference **hydrophone** applies to the frequency range 10 Hz to 2 kHz by **vibrating column**. It is carried out in an open chamber, with its wavelength larger than the length of the column, allowing a **hydrophone** to be calibrated in a simple way [12], [29]. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

11.2 Principle

11.2.1 General

Immerse a **hydrophone** in a column of liquid, which is excited externally by a sinusoidal vibration, while the **hydrophone** is held fixed and vertically suspended near to the central axis of the column.

The column of liquid shall be contained in a cylindrical vessel with rigid walls. Within this vessel, open at the top, the liquid column shall either be driven at the bottom by an

electrodynamic transducer, or the whole vessel shall be driven by a vibrating generator, in accordance with Figure 6.

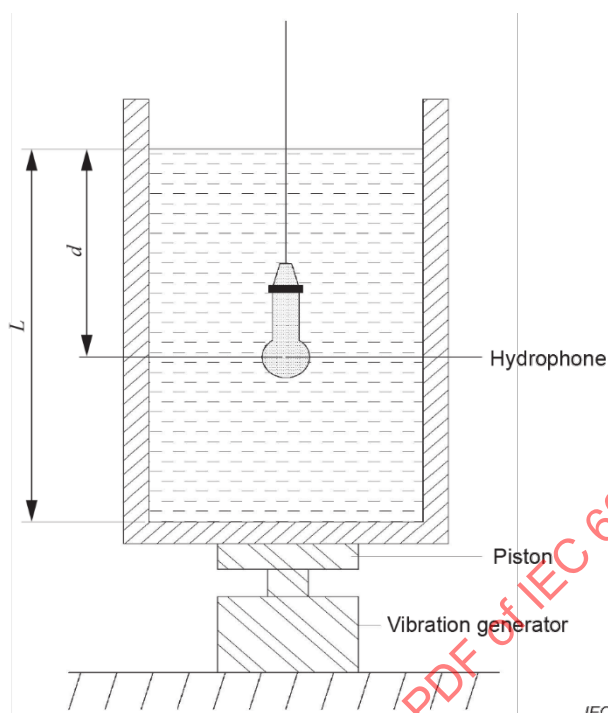


Figure 6 – Diagram of calibration by vibrating column

The sensitivity of the **hydrophone** shall be obtained from the calculated pressure at the depth of the **hydrophone** and the measured open-circuit voltage.

NOTE This method is an absolute calibration, although it lends itself to calibration by separated comparison as well. See 10.2.

The upper limit of the useful frequency range depends on the size of the vessel, which shall be smaller than a quarter of the wavelength of the sound in the liquid. See 11.3.1.

11.2.2 Expression for the pressure

Supposing that all parts of the liquid move equally with respect to their equilibrium position, the amplitude p_0 of the oscillating pressure at a point in the liquid at a depth of d below the surface shall be calculated by:

$$p_0 = \rho_f x_0 |g - d\omega^2| \quad (33)$$

where

ρ_f is the density of the liquid;

x_0 is the amplitude of the vibration of the bottom of the vessel.

NOTE Pressure fluctuations due to the flow of the liquid past the **hydrophone** are disregarded in Equation (33). These fluctuations are small compared with the **signal** pressure when the **hydrophone** is small compared with the depth of immersion and when the vibration amplitude is small compared with the size of the **hydrophone**. See [30].

At very low frequencies, where $d\omega^2$ is small compared with g , Equation (33) is reduced to:

$$p_0 = \rho_f g x_0 \quad (34)$$

which is independent of the frequency.

At higher frequencies, when $d\omega^2$ becomes large compared with g , the pressure is proportional to the square of the angular frequency:

$$p_0 = \rho_f x_0 d\omega^2 \quad (35)$$

The change-over is considered to take place at an angular frequency:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (36)$$

which, for example, corresponds to the frequency 1,6 Hz when $d = 10$ cm.

Hence, Equation (35) is valid practically at frequencies higher than 10 Hz.

11.2.3 Determination of the sensitivity

The modulus of the **pressure sensitivity** of the **hydrophone** $|M_p|$ shall be calculated as the ratio of the amplitudes of the sinusoidal signals of the open-circuit voltage U_0 and sound pressure p_0 , as given by Equations (33), (34) or (35):

$$|M_p| = \frac{U_0}{p_0} \quad (37)$$

The calibration shall be performed under the conditions specified in 5.7 and Clause 6.

The amplitude value of the sinusoidal open-circuit voltage at the terminals of the **hydrophone** shall be measured in accordance with 6.3.

For the determination of the amplitude value of the sinusoidal pressure signal, either the amplitude of the vibration x_0 at the bottom of the vessel or the amplitude of the acceleration $x_0\omega^2$ shall be measured.

The **uncertainty** in the results of these measurements shall be less than 1 % (95 % confidence levels).

The acceleration shall be measured by means of an accelerometer at the bottom of the vessel.

The depth of immersion d shall be measured at the reference centre of the part of the **hydrophone** designed to receive sound. Or the value of d shall be eliminated from the equation by repetition of the measurement at two different depths d_1 and d_2 . The peak values of the output voltages at the **hydrophone** shall be U_{01} and U_{02} , respectively.

Then, if

$$\Delta U_0 = U_{01} - U_{02} \quad (38)$$

and

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad (39)$$

then Equations (35) and (37) shall give either:

$$\Delta U_0 = \left| \underline{M}_p \right| \rho_f x_0 \omega^2 \Delta d \quad (40)$$

or

$$\left| \underline{M}_p \right| = \frac{\Delta U_0}{\Delta d} \frac{1}{\rho_f x_0 \omega^2} \quad (41)$$

NOTE In Equation (41), the absolute value of the immersion depth is eliminated and replaced by the difference between the immersion depths for two measurements. This difference can be established without knowledge of the location of the acoustic centre of the **hydrophone**.

The depth difference shall be measured with an **uncertainty** of less than 1 %.

11.3 Conditions of measurement

11.3.1 Mechanical

The **hydrophone**'s suspension shall be designed not to vibrate, neither by mechanical contact with the vessel, nor by viscous drag of the liquid. In order to avoid corrections for the hydrodynamic flow of the liquid past the **hydrophone**, the diameter of the column shall be large compared with the diameter of the **hydrophone**. For the same reason, the amplitude of the vibration shall be small compared with the size of the **hydrophone**.

The stiffness of the vessel shall be so high that the lowest resonance frequency of the empty vessel is higher than the lowest resonance frequency of the liquid column.

The height of the column shall be larger than its diameter.

NOTE 1 The lowest resonance frequency of such an open column of liquid occurs when the length of the column equals a quarter of the wavelength. When the frequency is lower than a quarter of this resonance frequency, the required correction is less than 1 dB.

For this condition $L \leq \frac{\lambda}{16}$, the length of the column shall not be larger than one-sixteenth of the wavelength of the sound in the liquid [30].

At higher frequencies, the sound pressure in the column is given by Equation (42):

$$p_0 = \rho_f x_0 \omega^2 d \frac{\sin\left(\frac{\omega d}{c}\right)}{\left(\frac{\omega d}{c}\right) \cos\left(\frac{\omega L}{c}\right)} \quad (42)$$

where

c is the speed of sound in the liquid column, taking into account the compliance of the walls of the vessel;

L is the length of the column.

NOTE 2 Equation (42) can be applied only if L is smaller than a quarter of the acoustic wavelength in the liquid.

NOTE 3 At low frequencies, the trigonometric fraction in Equation (42) approaches unity, giving Equation (35).

11.3.2 Acoustical

In order to make sure that the pure **pressure sensitivity** of the **hydrophone** is measured, the acoustic impedance presented by the **hydrophone** shall be large compared with the acoustic impedance of the liquid column. The latter value depends on the depth d and is in accordance with the equation for the specific acoustic impedance $\underline{Z}_{AI}$:

$$\underline{Z}_{AI} = j\rho c \tan \frac{\omega d}{c} \quad (43)$$

This value is zero at the surface and increases to infinity at a depth of a quarter of the wavelength. But, because the upper limit of the useful frequency range occurs where the total length of the column equals a quarter wavelength, the **hydrophone** shall never be placed at a point in the column where the specific acoustic impedance is infinitely high.

NOTE 1 Hence, near to the surface no **hydrophone**, not even the more compliant types, will disturb the sound field, provided that the **hydrophone** is small compared with the diameter of the column. At greater depth a point can be reached where the impedance modulus of the column becomes higher than the impedance modulus of the **hydrophone**. From this point at greater depths of immersion, the measured sensitivity of the **hydrophone** seems to decrease with depth. This can be verified by performing the calibration at various depths.

Taking into account the pressure distribution given in Equation (42), the sensitivity of the **hydrophone** shall not change with depth.

If, however, the sensitivity changes due to the relation between the impedance of the **hydrophone** and of the water column, the possibility of errors in the calibration shall be considered. See Annex B.

11.4 Relative calibration method

In this method, a reference **hydrophone** and a **hydrophone** to be calibrated shall be immersed into the vessel filled with fluid simultaneously, or shall replace each other. The reference centres of both **hydrophones** shall be held at the same horizontal plane and vertically suspended near to the central axis of the vessel. See Figure 7. Compared to the reference **hydrophone**, the sensitivity of the unknown **hydrophone** shall be calibrated in the frequency range from 10 Hz to 2 kHz.

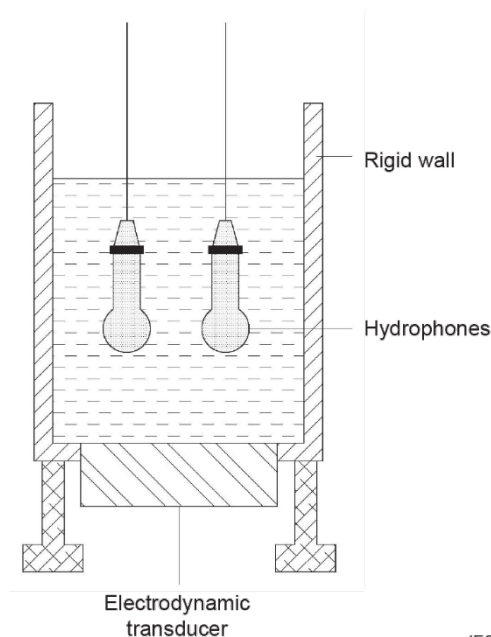


Figure 7 – Diagram of calibration by vibrating column using comparison

The modulus of the pressure sensitivity of the **hydrophone** $|M_p|$ shall be calculated from Equation (44):

$$|M_p| = \frac{U_H}{U_R} |M_R| \quad (44)$$

where

U_H is the open-circuit voltage at the **hydrophone** to be calibrated;

U_R is the open-circuit voltage at the reference **hydrophone**;

M_R is the **pressure sensitivity** of the reference **hydrophone**.

11.5 Uncertainty

The overall **uncertainty** shall be evaluated and stated with the **hydrophone** sensitivity.

Provided that the condition $L \leq \frac{\lambda}{16}$ is met, the pressure is given by Equation (34); and

provided that the density ρ_f of the liquid, the peak acceleration at the bottom of the vessel

$x_0 \omega^2$, the depth d and the peak output voltage U_{R0} are measured with an **uncertainty** of

less than 1 %, the overall expanded **uncertainty** is less than 0,6 dB (95 % confidence level).

If the comparison calibration is used, the overall expanded **uncertainty** is less than 1 dB (95 % confidence level) with careful practice.

NOTE Provided that Equation (34) is used for the pressure, the **uncertainties** in the speed of sound, the length of the column L and the depth of the **hydrophone** will influence the overall **uncertainty** of the final results.

12 Calibration by static pressure transducer

12.1 General

This method of **hydrophone** comparison calibration with a static pressure transducer applies to the frequencies from 0,5 Hz to 3,15 kHz. A loudspeaker produces the sound pressure

which propagates into the water shown in Figure 8, and a static pressure transducer is used as the reference **hydrophone** to receive the sound pressure, and compare with the **hydrophone** to be calibrated [12], [31]. For the implementation described here, this calibration method provides a value of the modulus of the **hydrophone** sensitivity only.

NOTE A distinctive feature of the static pressure transducer is that it works as a receiver for static pressure as well as alternating pressures. Sometimes, the static pressure transducer is known as tensiometric transducer.

12.2 Principle

12.2.1 Theory of static pressure calibration

A calibration chamber fabricated of a thick-walled stainless-steel body with an internal cylindrical cavity of radius r filled with water is shown in Figure 8. Mount a static pressure transducer into the bottom wall of the chamber. Place the **hydrophone** to be calibrated in the chamber axis so that the reference centres of the transducer and **hydrophone** are at the same depth. Attach a chamber cover with loudspeaker to the top of the chamber through the sealing gaskets. The hermetically sealed top part of the inner cavity between the loudspeaker and water surface of the chamber is filled with air.

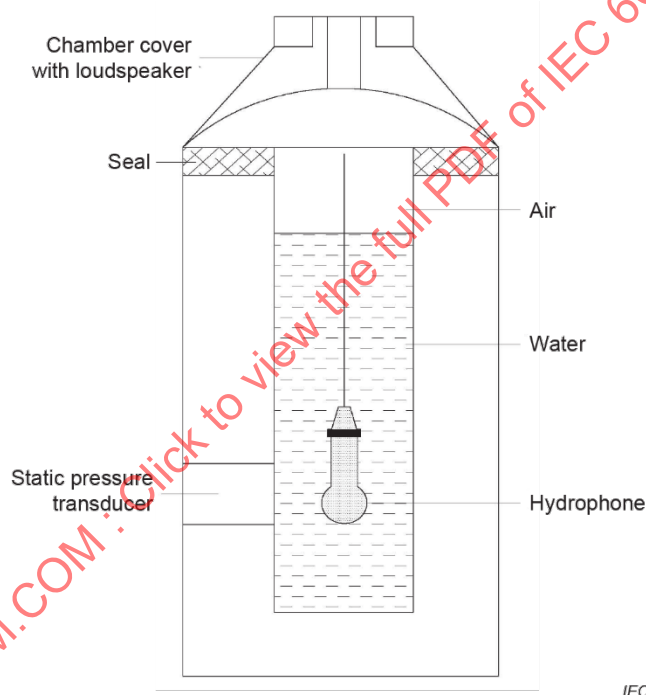


Figure 8 –Diagram of comparison calibration using static pressure transducer

A standing sound wave field in the chamber is created by exciting the loudspeaker with a sinusoidal electric current. The volume of the air cavity is changed with the oscillatory movement of the loudspeaker, and accordingly the pressure on the water surface, which excites the standing sound wave in the water column and acts on the **hydrophone** and static pressure transducer located in the chamber. **Hydrophone** sensitivity is determined by comparing the amplitudes of output voltages of the **hydrophone** to those of the static pressure transducer.

12.2.2 Determination of the sensitivity of static pressure transducer

The sensitivity of the static pressure transducer is determined by altering the height of the water column in the chamber. The water level of the chamber is above the static pressure transducer, and the output voltage of the static pressure transducer is U_{R1} . Immersion of the body with exactly known volume V_0 alters the height of the water column, and the output

voltage of the static pressure transducer changes to U_{R2} . According to the formula of Pascal, the hydrostatic pressure change Δp is:

$$\Delta p = \rho g \frac{V_0}{\pi r^2} \quad (45)$$

where

$\frac{V_0}{\pi r^2}$ is the change in height of the water column.

The modulus of the sensitivity of the static pressure transducer M_T is determined by:

$$|M_T| = \frac{U_{R2} - U_{R1}}{\Delta p} \quad (46)$$

where

U_R is the open-circuit voltage at the static pressure transducer.

12.2.3 Calculation of the pressure sensitivity

Hydrophone pressure sensitivity M_p is determined by comparing the amplitudes of output voltages of the **hydrophone** to the static pressure transducer:

$$|M_p| = \frac{U_H}{U_R} |M_T| \quad (47)$$

12.3 Limitations

Due to the high (tens of kilohertz) frequency of the first self-resonance, the sensitivity of the transducer at frequencies below a few kilohertz is a very weak function of frequency. This allows the calibration of the reference transducer by an absolute method with reference to static pressure, thereby providing traceability to standards of hydrostatic pressure. The absence of frequency dependence makes it possible to extend the sensitivity value obtained with respect to static pressure to frequencies up to 3,15 kHz.

NOTE Advantages of the proposed implementation of the method of comparison: convenience and simplicity of the experimental setup since mounting **hydrophones** of varying designs into the chamber requires only sealing of the **hydrophone** cables; high precision of calibration of reference transducer using static pressures.

12.4 Uncertainty

It is expected that the overall expanded **uncertainty** for comparison calibration using static pressure transducer can be less than 0,3 dB (95 % confidence level).

Annex A (informative)

Advanced acoustic coupler calibration methods

A.1 General

Advanced acoustic **coupler** calibration methods which use a reference **coupler** or a subsidiary body of known compliance are shown in Clauses A.2, A.3 and A.4 [32], [33].

The derivation of the general equations for a reciprocity calibration (as outlined in Clause 9) are as follows. When a current I_P flows through a **projector** P with a **transmitting response to current** of a **projector** in a **coupler** $S_{I,P}$, the **projector** generates a sound pressure p which is calculated by:

$$p = |S_{I,P}| I_P \quad (\text{A.1})$$

A **hydrophone** H with **pressure sensitivity** $M_{p,H}$ is placed in the **coupler**, producing an open circuit voltage U_{PH} given by:

$$U_{PH} = |M_{p,H}| p = |M_{p,H}| |S_{I,P}| I_P \quad (\text{A.2})$$

The **electrical transfer impedance** modulus $|Z_{PH}|$ of this transducer pair is calculated by:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = |M_{p,H}| |S_{I,P}| \quad (\text{A.3})$$

In a second step, the **electrical transfer impedance** modulus $|Z_{PT}|$ is determined after replacement of the **hydrophone** H by a **reciprocal transducer** T, by:

$$|Z_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_P} = |M_{p,T}| |S_{I,P}| \quad (\text{A.4})$$

In a third step, the **electrical transfer impedance** modulus $|Z_{TH}|$ is determined as follows:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = |M_{p,H}| |S_{I,T}| \quad (\text{A.5})$$

Now, it can easily be shown that:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = |M_{p,T}| |S_{I,T}| \quad (\text{A.6})$$

For a **reciprocal transducer**, the quotient of the moduli of the **pressure sensitivity** and the **transmitting response to current** is equal to the reciprocity parameter for a small chamber ωC_t :

$$\frac{|M_{p,T}|}{|S_{i,T}|} = \omega C_t \quad (\text{A.7})$$

where

C_t is the total acoustic compliance of the **coupler**.

As the product and the quotient of the **pressure sensitivity** and the **transmitting response to current** of the transducer T are known from Equation (A.7), the modulus of the **pressure sensitivity** $M_{p,H}$ of the **hydrophone** H can be calculated from Equation (A.8):

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (\text{A.8})$$

where C_t is the total acoustic compliance of the **coupler** (9.2.4).

The moduli of the **pressure sensitivity** $M_{p,T}$ and the **transmitting response to current** $S_{i,T}$ of the transducer T are calculated from Equations (A.9) and (A.10):

$$|M_{p,T}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (\text{A.9})$$

$$|S_{i,T}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (\text{A.10})$$

Similarly, the modulus of the **transmitting response to current** $S_{i,P}$ of the **projector** P is given by:

$$|S_{i,P}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (\text{A.11})$$

A.2 Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers and a hydrophone to be calibrated

A.2.1 General

Place the two **reciprocal transducers** in a reference **coupler** whose volume and acoustic compliance are accurately known. Measure the **electrical transfer impedance** between one of the transducers used as a **projector** and the other transducer used as a **hydrophone** at a number of frequencies throughout the frequency range of interest.

Place the two **reciprocal transducers** in an auxiliary **coupler** along with the **hydrophone** to be calibrated. Measure the **electrical transfer impedances** between each of the transducers and the **hydrophone** and between each of the transducers and the other transducer used as a **hydrophone** at the same frequencies above.

From the five **electrical transfer impedances** measured at each frequency, calculate the acoustic **pressure sensitivity** of the **hydrophone**.

NOTE 1 The fill fluids in the two **couplers** do not need to be the same.

NOTE 2 One **coupler** can serve both purposes if it is designed so that its properties are well known when the **hydrophone** is not present.

A.2.2 Theory

The arrangement for a reciprocity calibration shall be in accordance with Figure A.1 and Figure A.2.

NOTE Figure A.1 shows two transducers in a reference **coupler**, and Figure A.2 shows three transducers in an auxiliary **coupler**.

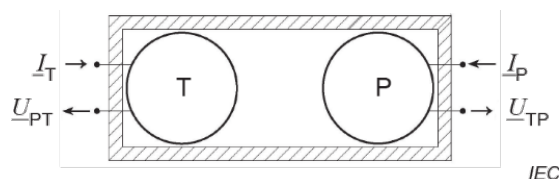


Figure A.1 – Reference coupler with two transducers: a projector P and a reciprocal transducer T

Place two **reciprocal transducers**, T and P, and a **hydrophone** H in the auxiliary **coupler**. If we denote all quantities that refer to the auxiliary **coupler** with primes, then from Equation (A.8), the **hydrophone** sensitivity can be calculated by:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t' \frac{|Z_{PH}'| |Z_{TH}'|}{|Z_{PT}'|} \quad (\text{A.12})$$

where C_t' is not known.

To determine the **electrical transfer impedance** between the transducer T as a sound source and the **projector** P as a **hydrophone**, measure the electrical current I_t' into transducer T and the voltage U_{TP}' . The relationship between the input current and output voltage is:

$$U_{TP}' = |M_{p,P}| |S_{t,T}'| I_t' \quad (\text{A.13})$$

where

$S_{t,T}'$ is the **transmitting response to current** of the transducer in the auxiliary **coupler**.

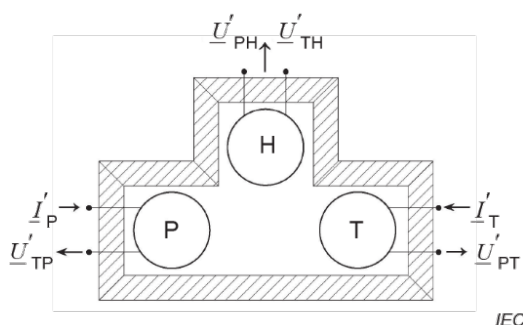


Figure A.2 – Auxiliary coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T and a hydrophone H to be calibrated

From Equation (A.2), the **electrical transfer impedance** $|Z'_{TP}|$ is calculated by:

$$|Z'_{TP}| = \frac{U'_{TP}}{I'_T} = |M_P| |S'_T| \quad (\text{A.14})$$

Since the transducer T is reciprocal, calculate:

$$|S'_T| = \frac{|M_T|}{\omega C'_t} \quad (\text{A.15})$$

Substituting Equation (A.15) into Equation (A.14) yields Equation (A.16):

$$|Z'_{TP}| = \frac{|M_P| |M_T|}{\omega C'_t} \quad (\text{A.16})$$

Now place the two **reciprocal transducers** in the reference **coupler** and measure the **electrical transfer impedance** between the **projector** P as a sound source and the transducer T as a **hydrophone**. In the same manner as above, calculate:

$$|Z_{TP}| = \frac{|M_P| |M_T|}{\omega C_t} \quad (\text{A.17})$$

From Equations (A.16) and (A.17), the relationship between the compliance in the auxiliary **coupler** and the compliance in the reference **coupler** can be written as:

$$C'_t = C_t \frac{|Z_{TP}|}{|Z'_{TP}|} \quad (\text{A.18})$$

Substitute Equation (A.18) into Equation (A.12):

$$|M_{P,H}|^2 = \omega C_t |Z_{TP}| \frac{|Z'_{PH}| |Z'_{TH}|}{|Z'_{TP}| |Z'_{PT}|} \quad (\text{A.19})$$

NOTE Using this method, ordinary small hard **hydrophones** can be calibrated with low **uncertainty**. The fill fluid in the auxiliary **coupler** can differ from that in the reference **coupler**. The compliance in the auxiliary **coupler** does not need to be known and is, in effect, measured by measuring the transfer impedance between the two **reciprocal transducers** in each of the two **couplers**.

A.3 Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers, a hydrophone to be calibrated, and a sound source

A.3.1 General

Place the two **reciprocal transducers** in a reference **coupler** whose volume and acoustic compliance are accurately known. Measure the **electrical transfer impedance** between one of the transducers used as a **projector** and the other transducer used as a **hydrophone** at a number of frequencies throughout the frequency range of interest.

Place the two **reciprocal transducers** in an auxiliary **coupler** along with the **hydrophone** to be calibrated and the sound source. Measure the **electrical transfer impedance** between the sound source and the **hydrophone** and between the sound source and each of the **reciprocal transducers** used as a **hydrophone** at the same frequencies as above.

From the four **electrical transfer impedances** measured at each frequency, calculate the acoustic **pressure sensitivity** of the **hydrophone**.

NOTE The fill fluids in the two **couplers** do not need to be the same.

A.3.2 Theory

Figure 5 shows two transducers in the reference **coupler** and Figure A.3 shows three transducers and a sound source in an auxiliary **coupler**. The arrangement for a calibration shall be in accordance with Figure A.1 and Figure A.3.

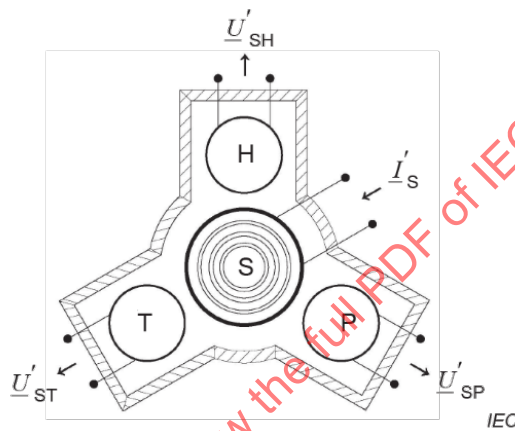


Figure A.3 – Auxiliary coupler with four transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, a sound source S and a hydrophone H to be calibrated

The ratio $\frac{|Z'_{PH}|}{|Z'_{PT}|}$ is the ratio of voltages out of the **hydrophone** H and the transducer T when subjected to the same sound pressure level produced by the **projector** P. This ratio is independent of the transducer used to produce the sound. If a sound source S produces the sound, calculate the following:

$$\frac{|Z'_{PH}|}{|Z'_{PT}|} = \frac{|Z'_{SH}|}{|Z'_{ST}|} \quad (\text{A.20})$$

In a similar manner, the following calculation can be carried out:

$$\frac{|Z'_{TH}|}{|Z'_{TP}|} = \frac{|Z'_{SH}|}{|Z'_{SP}|} \quad (\text{A.21})$$

Substituting Equations (A.20) and (A.21) into Equation (A.19) yields:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t |Z_{TP}| \frac{|Z'_{SH}| |Z'_{SH}|}{|Z'_{SP}| |Z'_{ST}|} \quad (\text{A.22})$$

NOTE Using this method, ordinary small hard **hydrophones** can be calibrated to high accuracy. The fill fluid in the auxiliary **coupler** can differ from that in the reference **coupler**. The compliance in the auxiliary **coupler** does not need to be known and is, in effect, measured by measuring the **electrical transfer impedance** between the two **reciprocal transducers** in each of the two **couplers**. Only the acoustic pressures at T, P, and H are required to be the same. Once the **electrical transfer impedance** $|Z_{TP}|$ is measured, the transducer does not need to be used as a sound source again. This results in maximum stability for the transducer T.

A.4 Acoustic-coupler calibration using a coupler, a reciprocal transducer, a projector, a hydrophone to be calibrated, and a subsidiary body of known compliance

A.4.1 General

A **reciprocal transducer**, a linear electro-acoustic sound source, a **hydrophone** and a subsidiary material of known compliance shall be used for the calibration. The **hydrophone** sensitivity can be determined.

At first, do not place the subsidiary body in the **coupler**. Place the three transducers in the **coupler** and fill the **coupler** with a fluid (usually water). Using the **reciprocal transducer** as a **projector** and the **hydrophone** as a receiver, measure the modulus of the **electrical transfer impedance** at a number of frequencies throughout the frequency range of interest.

Using as the sound source the **projector** and alternately the **reciprocal transducer** and both the **hydrophone** and **reciprocal transducer** as receivers, measure the **electrical transfer impedances** at the same set of frequencies as the above measurements.

Place the subsidiary body in the **coupler**. Measure again the above three **electrical transfer impedances**.

From the six **electrical transfer impedances** measured at each frequency, calculate the acoustic **pressure sensitivity** of the **hydrophone**.

NOTE Knowledge of the **coupler** compliance is not required.

A.4.2 Theory

The arrangement of the **hydrophone**, **projector**, transducer and subsidiary body shall be in accordance with Figure A 4. This is an acoustic **coupler** and so is in accordance with 9.2 whether or not the subsidiary body is in the **coupler** [24].

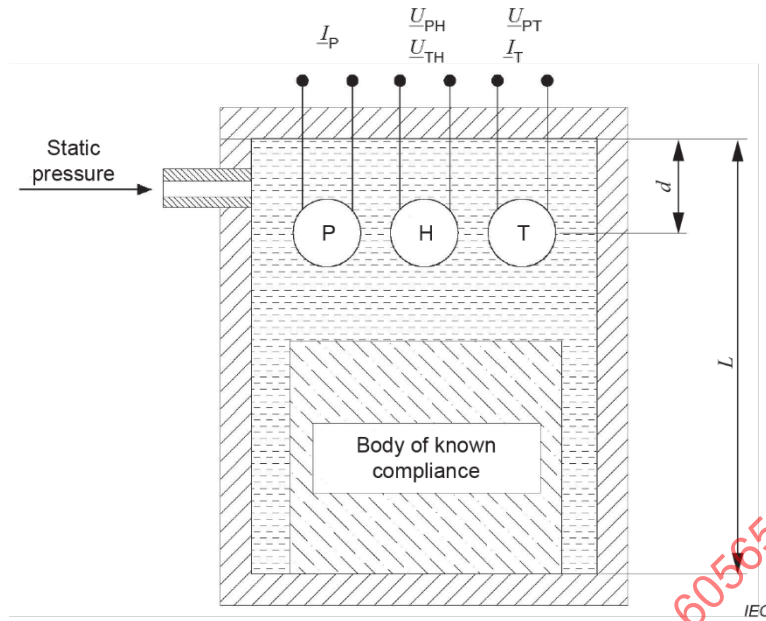


Figure A.4 – Schematic drawing of the measuring system

NOTE In this method, it is assumed that the acoustic compliance of the **coupler** without the subsidiary body is not known, but that the acoustic compliance of the subsidiary body is accurately known. In effect, the acoustic compliance of the **coupler** is determined from the acoustic compliance of the subsidiary body.

As in 9.2.2, calculate the free-field open-circuit sensitivity of a **hydrophone** in a **coupler** without the subsidiary body by:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \equiv \omega C_t Z \quad (\text{A.23})$$

where

$|Z_{PH}|$ is the modulus of the **electrical transfer impedance** of the transducer pair of **projector P** and **hydrophone H**;

$|Z_{TH}|$ is the modulus of the **electrical transfer impedance** of the transducer pair of transducer T and **hydrophone H**;

$|Z_{PT}|$ is the modulus of the **electrical transfer impedance** modulus of the transducer pair of **projector P** and transducer T;

Z contains all the terms involving transfer impedances.

Now, if the subsidiary body is placed in the **coupler**, the **coupler** compliance can be calculated from $C_t + \Delta C_t$ where ΔC_t is given by:

$$\Delta C_t = V_b \left\{ \frac{3(1-2\sigma)}{E} - \frac{1}{\rho_f c_f^2} \right\} \quad (\text{A.24})$$

where

V_b is the volume of the subsidiary body;

E is Young's modulus for the subsidiary body;

σ is Poisson's modulus for the subsidiary body;

- ρ_f is the density of **coupler** fluid;
- c_f is the speed of sound in the **coupler** fluid;
- $\frac{3V_b(1-2\sigma)}{E}$ is the acoustic compliance of the subsidiary body;
- $\frac{V_b}{\rho_f c_f^2}$ is the acoustic compliance of the fluid displaced by the subsidiary body.

$$|M_{p,H}|^2 = \omega(C_t + \Delta C_t) \frac{|Z'_{PH}| |Z'_{TH}|}{|Z'_{PT}|} \equiv \omega(C_t + \Delta C_t) Z' \quad (\text{A.25})$$

Eliminating C_t from Equations (A.23) and (A.25) gives:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega \Delta C_t \frac{Z Z'}{|Z - Z'|} \quad (\text{A.26})$$

The upper frequency limit for a given **coupler** size can be increased using the following correction factor K_f^2 for Equation (A.26):

$$K_f^2 = \frac{\sin(kL)}{kL \cos(kd) \cos[k(L-d)]} \quad (\text{A.27})$$

where

- k is **wavenumber**;
- L is length of **coupler**;
- d is distance from chamber lid to plane of the transducers (see Figure A.4).

In this case, the corrected value of the **pressure sensitivity** of a **hydrophone** can be calculated from:

$$(|M_{p,H}|)_{\text{cor}} = K_f |M_{p,H}| \quad (\text{A.28})$$

NOTE 1 For a chamber cavity of dimensions 175 mm (diameter) and 500 mm (length), the overall expanded **uncertainty** of the calibration (95 % confidence levels) can be less than 0,5 dB up to 500 Hz [19].

NOTE 2 This method does not require knowledge of the compliance of the **coupler**, which is usually difficult to determine accurately. It instead depends upon a knowledge of the compliance of a subsidiary body and the fill fluid, which can be determined accurately.

Annex B (informative)

Assessment of uncertainty in the low frequency pressure calibration of hydrophone

B.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated **uncertainty**. According to ISO/IEC Guide 98-3 [10], **uncertainty** components are grouped according to how the values are estimated:

Type A: evaluated by statistical means;

Type B: evaluated by other means.

B.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.

B.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 can 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.

B.4 Reported uncertainty

The combined **uncertainty** should be obtained from the individual components [10]. 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 being introduced by the asymmetric distributions.

B.5 Common sources of uncertainty

The following is a list of 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 necessarily 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 might be the measurement of separation distance in a reciprocity calibration), a Type A evaluation will also be required.

Sources of **uncertainty** specific to hydrostatic excitation calibrations [12] to [14]:

- a) **uncertainties** caused by determination of amplitude of the displacement of water surface in the open vessel;
- b) **uncertainty** in the production of the vibration frequency;
- c) **uncertainties** caused by determination of the increasing factor;
- d) **uncertainties** caused by determination of the equivalent height.

Sources of **uncertainty** specific to piezoelectric compensation calibrations [17] to [20]:

- e) **uncertainties** caused in the design and fabrication of the calibration chamber;
- f) **uncertainties** caused by the determination of the characteristic constant of the piezoelectric null transducer.

Sources of **uncertainty** specific to acoustic **coupler** reciprocity calibrations [12], [21], [22]:

- g) **uncertainties** of the acoustic compliance;
- h) **uncertainty** caused by the field non-uniformity within **coupler**;
- i) non-reciprocal and non-linear behaviour by transducers (can be evaluated by the reciprocity and linearity verification);
- j) **uncertainties** in the values for acoustic frequency (required to calculate the reciprocity parameter);
- k) **uncertainty** in the value for water density (required to calculate the reciprocity parameter).

Sources of **uncertainty** specific to **pistonphone** calibrations [12], [28]:

- l) **uncertainty** in the measurement of the piston displacement amplitude;
- m) **uncertainty** in the measurement of the effective area of the piston;

- n) **uncertainty** in the measurement of the equilibrium air volume and pressure of the chamber.

Sources of **uncertainty** specific to **vibrating column** calibrations [12], [29]:

- o) **uncertainties** caused by the design and fabrication of the vessel;
- p) **uncertainty** in the value for density of the liquid;
- q) **uncertainty** in the measurement of the peak acceleration at the bottom of the vessel;
- r) **uncertainty** in the value of the depth.

Sources of **uncertainty** specific to static pressure calibrations [12], [31]:

- s) **uncertainties** caused by the design and fabrication of the vessel;
- t) **uncertainty** caused by the determination of the alternating pressure;
- u) **uncertainties** in the calibration of the static pressure transducer.

Sources of **uncertainty** specific to comparison calibrations [5], [12]:

- v) **uncertainties** in the calibration of the reference **hydrophone** (a major source of **uncertainty** in a comparison calibration);
- w) **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);
- x) **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);
- y) 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** common to all above methods [5], [12]:

- z) **uncertainty** in measurement of the receive voltage (including **uncertainty** due to the measuring instrumentation (voltmeter, digitizers, etc.);
- aa) **uncertainty** of the gains of any amplifiers, filters, and digitizers used;
- bb) **uncertainties** in the measurement of the drive current or voltage;
- cc) **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);
- dd) **uncertainty** of any electrical **signal** attenuators used;
- ee) electrical noise including radio frequency pick-up;
- ff) **uncertainty** of any electrical loading corrections made to account for loading by extension cables and preamplifiers;
- gg) bubbles or air film clinging to transducers (this should be minimized by adequate wetting and soaking of transducers);
- hh) environmental conditions, such as water temperature and applied hydrostatic pressure (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).

Bibliography

- [1] IEC 60565:2006, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz*
- [2] ISO 18405:2017, *Underwater acoustics – Terminology*
- [3] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [4] IEC 60050-726:1982, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 726: Transmission lines and waveguides*
- [5] 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
- [6] VAN BUREN A L, DRAKE R M and PAOLERO A E. Temperature dependence of the sensitivity of hydrophone standards used in international comparisons. *Metrologia*, 1999, vol. 36, p. 281-295
- [7] 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*, 2002, vol. 88, p. 799
- [8] IVEY L E and THOMPSON C M. Underwater transducer wetting agents. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, vol. 78, p. 389-394
- [9] ROBINSON S P and DORE 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, United Kingdom, 1992
- [10] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [11] 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, *Meas. Sci. Technol.*, 2007, 18:N47-N52
- [12] BOBBER R J. *Underwater electroacoustic measurements*. Peninsula Press, Los Altos CA, 1988
- [13] GOLENKOV A N. Absolute calibration of infrasonic pressure detectors in an air and water resonator with hydrostatic excitation. in Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1965, vol. 5, p. 41. [English translation: *Measurement Techniques*, 1965, vol. 8, p. 444]
- [14] YUAN W-J et al. Bilateral calibration comparison of standard hydrophones between China and Russia in frequency range of 0.01 to 1 Hz, *The Proceedings of the China association for science and technology*, 2006, Vol. 3, No. 1, p. 408-413
- [15] BURENKOV Y, PLATONOV F and PLATONOV V. Estimation of dynamic effects in low-frequency hydrophone calibration. *Proceedings of the 2nd EAA International Symposium on Hydroacoustics*, 24-27 May 1999, Gdansk-Jurata, Poland

- [16] NEKRASOV V N and NEKRICH S F. An application of hydrostatic method for the calibration of hydrophones at high static pressure. In Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1989, vol. 10, p. 51. [English translation: *Measurement Techniques*, 1989, vol. 10, p. 1023]
- [17] GOLENKOV A N and LIKHACHEV S M. Features of the calibration of hydrophones in the nonuniform field of measuring chambers. In Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 11, 57 (1994). [English translation: *Measurement Techniques*, 37, 1301 (1994)]
- [18] TROTT W J and LIDE E N. Two-projector null method for calibration of hydrophones at low audio and infrasonic frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1955, vol. 27, p. 951
- [19] GOLENKOV A N. Calibration of measuring hydrophones in the frequency range 0.1 to 100 Hz. In Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 9, 53 (1961). [English translation: *Measurement Techniques*, 4, 752 (1961)]
- [20] GOLENKOV AN and PAVLOV LE. Absolute calibration of measuring hydrophones in the audio-frequency range. in Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 5, 44 (1967). [English translation: *Measurement Techniques*, 10, 579 (1967)]
- [21] SIMS C C and HENRIQUEZ T A. Reciprocity calibration of a standard hydrophone at 16 000 psi. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, vol. 36, p. 1704
- [22] MCMAHON G A. Coupler-reciprocity system for hydrophone calibration at high pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, vol. 36, p. 2311
- [23] SLATER W H, CROCKER S E and BAKER S R. A primary method for the complex calibration of a hydrophone from 1 Hz to 2 kHz. *Metrologia*, 2018, vol. 55, p. 84
- [24] MCKINNEY J E, EDELMAN S and MARVIN R S. Apparatus for the direct determination of the dynamic bulk modulus. *Journal of Applied Physics*, 1956, vol. 27, p. 425
- [25] NEKRASOV V N and NEKRICH S F. Modified reciprocity method for the calibration in small-volume chambers. In Russian: *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1, 43 (1988) [English translation: *Measurement Techniques*, 31, 77 (1988)]
- [26] BARHAMRG. The NPL laser pistonphone. *J. Low Frequency Noise and Vibration*, 1993, vol. 12, p. 36-38
- [27] BARHAM R G and GOLDSMITH M J. The application of the NPL laser pistonphone to the international comparison of measurement microphones, *Metrologia*, 2007, vol. 44, p. 210-216
- [28] LIPSCOMB L W I. An instrument semi-automatic acoustic calibration system and attachments thereto. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 1985, vol. 6, p.113
- [29] MERHAUT J and VLCEK M. Pistonphone with differential piston. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1958, vol. 30, p.263
- [30] SCHLOSS F and STRASBERG M. Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1962, vol. 34, p.958
- [31] ISAEV A E et al. Modernized national primary special standard for the unit of acoustic pressure in water media. *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53(5), p.465-470

- [32] ZALESK J F. Transfer coupler reciprocity: A new low-frequency coupler-reciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 105, p.2342
 - [33] ZALESK J F. Considerations for a new high-accuracy transfer-coupler reciprocity system for absolute electro-acoustic calibration. *Metrologia*, 1999, vol. 36, p.305
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-2:2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	57
INTRODUCTION.....	59
1 Domaine d'application	60
2 Références normatives	60
3 Termes et définitions	60
4 Symboles	64
5 Procédures d'étalonnage	66
5.1 Principes.....	66
5.2 Limites de champ.....	66
5.3 Choix schématique des procédures.....	66
5.4 Compte-rendu des résultats	66
5.5 Périodes de réétalonnage	67
5.6 Considérations relatives à la température et à la pression pour l'étalonnage.....	67
5.7 Préparation des transducteurs	67
6 Mesurages électriques.....	67
6.1 Forme du signal	67
6.2 Mise à la terre.....	67
6.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone.....	68
6.3.1 Généralités.....	68
6.3.2 Charge électrique par l'appareil de mesure.....	68
6.3.3 Charge électrique par le câble prolongateur	68
6.3.4 Diaphonie et interférences acoustiques	68
6.3.5 Préamplificateur intégré.....	68
6.4 Mesurage du courant traversant le projecteur	68
7 Étalonnage par excitation hydrostatique	69
7.1 Généralités	69
7.2 Principe	69
7.2.1 Détermination de la pression alternative	69
7.2.2 Détermination du facteur de correction	70
7.2.3 Détermination de la hauteur équivalente.....	71
7.2.4 Calcul de la sensibilité en pression de l'hydrophone	72
7.3 Conception du système de vibration.....	72
7.4 Autre méthode pour l'excitation hydrostatique.....	73
7.5 Incertitude.....	73
8 Étalonnage par compensation piézoélectrique	74
8.1 Généralités	74
8.2 Principe	74
8.2.1 Détermination de la pression acoustique	74
8.2.2 Détermination de la constante caractéristique.....	75
8.2.3 Calcul de la sensibilité en pression de l'hydrophone	76
8.3 Conception de la chambre d'étalonnage.....	76
8.3.1 Généralités.....	76
8.3.2 Chambre pour basses fréquences.....	76
8.3.3 Chambre pour hautes fréquences	76
8.4 Limites pratiques de la méthode de compensation piézoélectrique.....	77
8.5 Méthode d'étalonnage relatif	78

8.6	Incertitude.....	78
9	Étalonnage par réciprocité du coupleur acoustique.....	78
9.1	Généralités	78
9.2	Principe	79
9.2.1	Théorie de la réciprocité du coupleur acoustique	79
9.2.2	Procédures d'étalonnage par réciprocité.....	79
9.2.3	Calcul de l'impédance de transfert.....	80
9.2.4	Détermination de l'élasticité acoustique	80
9.3	Limites de la réciprocité du coupleur acoustique	81
9.3.1	Limite de fréquence	81
9.3.2	Limite applicable aux hydrophones	81
9.4	Mesurage.....	81
9.4.1	Généralités	81
9.4.2	Mise en évidence des effets d'interférence	81
9.4.3	Vérification de la réciprocité	81
9.4.4	Vérification de la linéarité	82
9.5	Incertitude.....	82
10	Étalonnage par pistonphone	83
10.1	Généralités	83
10.2	Principe	83
10.2.1	Détermination de la pression acoustique	83
10.2.2	Détermination de l'élasticité du milieu.....	83
10.2.3	Calcul de la sensibilité en pression.....	84
10.3	Limites	84
10.4	Étalonnage relatif.....	85
10.4.1	Comparaison avec un transducteur de référence	85
10.4.2	Comparaison par pistonphone air-eau.....	85
10.5	Incertitude.....	86
11	Étalonnage par colonne vibrante	86
11.1	Généralités	86
11.2	Principe	86
11.2.1	Généralités.....	86
11.2.2	Expression pour la pression.....	87
11.2.3	Détermination de la sensibilité.....	88
11.3	Conditions de mesure	89
11.3.1	Conditions mécaniques.....	89
11.3.2	Conditions acoustiques.....	90
11.4	Méthode d'étalonnage relatif.....	90
11.5	Incertitude.....	91
12	Étalonnage par transducteur de pression statique	92
12.1	Généralités	92
12.2	Principe	92
12.2.1	Théorie de l'étalonnage par pression statique.....	92
12.2.2	Détermination de la sensibilité du transducteur de pression statique	93
12.2.3	Calcul de la sensibilité en pression.....	93
12.3	Limites	93
12.4	Incertitude.....	93
Annexe A (informative)	Méthodes d'étalonnage par coupleur acoustique évolué	94

A.1	Généralités	94
A.2	Étalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur de référence avec deux transducteurs réciproques et un coupleur auxiliaire avec les deux mêmes transducteurs et un hydrophone à étalonner	95
A.2.1	Généralités	95
A.2.2	Théorie	96
A.3	Étalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur de référence avec deux transducteurs réciproques et un coupleur auxiliaire avec les deux mêmes transducteurs, un hydrophone à étalonner et une source sonore	98
A.3.1	Généralités	98
A.3.2	Théorie	98
A.4	Étalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur, d'un transducteur réciproque, d'un projecteur, d'un hydrophone à étalonner et d'un organe subsidiaire d'élasticité connue	99
A.4.1	Généralités	99
A.4.2	Théorie	100
Annexe B (informative)	Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage à basse pression de fréquence des hydrophones	102
B.1	Généralités	102
B.2	Évaluation de Type A de l'incertitude	102
B.3	Évaluation de Type B de l'incertitude	102
B.4	Incertaince déclarée	102
B.5	Sources communes d'incertitude	103
Bibliographie		106
Figure 1	– Schéma d'étalonnage par excitation hydrostatique	69
Figure 2	– Schéma d'étalonnage par compensation piézoélectrique	75
Figure 3	– Schéma de la chambre pour hautes fréquences	77
Figure 4	– Coupleur de réciprocité avec trois transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T et un hydrophone H à étalonner	79
Figure 5	– Étalonnage par comparaison au moyen d'un pistonphone avec un hydrophone étalonné	86
Figure 6	– Schéma d'étalonnage par colonne vibrante	87
Figure 7	– Schéma d'étalonnage par colonne vibrante (par comparaison)	91
Figure 8	– Schéma d'étalonnage par comparaison avec transducteur de pression statique	92
Figure A.1	– Coupleur de référence avec deux transducteurs: un projecteur P et un transducteur réciproque T	96
Figure A.2	– Coupleur auxiliaire avec trois transducteurs: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner	97
Figure A.3	– Coupleur auxiliaire avec quatre transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T, une source sonore S et un hydrophone H à étalonner	98
Figure A.4	– Schéma du système de mesure	100

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES –
ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES –****Partie 2: Procédures pour l'étalonnage à basse pression de fréquence****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. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments 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 60565-2 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons.

Cette première édition de l'IEC 60565-2, avec l'IEC 60565-1, 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) L'IEC 60565 a été divisée en deux parties:
 - Partie 1: Procédures pour l'étalonnage en champ libre;
 - Partie 2: Procédures pour l'étalonnage à basse pression de fréquence (le présent document).

- 2) Une méthode d'étalonnage relatif a été ajoutée à l'Article 8: Étalonnage par compensation piézoélectrique.
- 3) Une méthode d'étalonnage relatif a été ajoutée à l'Article 11: Etalonnage par **colonne vibrante**.
- 4) L'Article 12: Etalonnage par transducteur de pression statique a été ajouté.
- 5) L'Annexe A: Circuit équivalent du système d'excitation pour l'étalonnage avec une **colonne vibrante**, a été supprimée.
- 6) Les paragraphes 9.6, 9.7 et 9.8 ont été déplacés pour constituer une nouvelle Annexe A: Méthodes d'étalonnage par coupleur acoustique évolué.

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

FDIS	Rapport de vote
87/720/FDIS	87/723/RVD

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

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

NOTE Les mots en **gras** dans le texte sont des termes 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 à la publication recherchée. À cette date, le document sera

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

INTRODUCTION

L'objet du présent document est d'établir les procédures applicables aux étalonnages à basse pression de fréquence des **hydrophones** dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à plusieurs kilohertz.

Pour assurer le caractère approprié des étalonnages, les **hydrophones** à étalonner sont des **hydrophones** "rigides" de petites dimensions par comparaison avec la longueur d'onde acoustique, et ne sont pas sensibles aux vibrations lorsqu'ils sont étalonnés.

Les principes, procédures et **incertitudes** des étalonnages physiques tels qu'excitation hydrostatique, compensation piézoélectrique, **pistonphone**, **colonne vibrante**, transducteur de pression statique, etc., et des étalonnages de réciprocité des **coupleurs** acoustiques sont stipulés dans le présent document. Les étalonnages sont effectués par l'une de ces méthodes, en fonction des différents principes à utiliser, et de ses limites applicables au champ acoustique et à la bande de fréquences.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60565-2:2019

ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES – ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES –

Partie 2: Procédures pour l'étalonnage à basse pression de fréquence

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60565 spécifie les méthodes d'étalonnage à basse pression de fréquence des **hydrophones** à des fréquences comprises entre 0,01 Hz et plusieurs kilohertz selon la méthode d'étalonnage.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-801, *Vocabulaire Electrotechnique 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, 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

coupleur

appareil comprenant une chambre rigide remplie de fluide, dans laquelle les transducteurs et les **hydrophones** peuvent être insérés, et dont la plus grande dimension est réduite par rapport à la longueur d'onde

Note 1 à l'article: Dans le présent document, le terme "petite chambre" est équivalent au terme "**coupleur**".

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1]¹, 3.3, modifiée – Dans la définition, "de petites dimensions," a été supprimée et ", et dont la plus grande dimension est réduite par rapport à la longueur d'onde" a été ajoutée.]

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

3.2

facteur de diffraction

rapport de la valeur efficace de la pression acoustique établie en moyenne sur la partie de l'**hydrophone** conçue pour recevoir une onde plane incidente provenant d'une direction donnée, à la pression acoustique efficace en champ libre qui existerait à la position du centre de référence de l'**hydrophone** si ce dernier était retiré

Note 1 à l'article: Le calcul de la moyenne dans l'espace précède celui de la moyenne dans le temps.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.3, modifiée – Dans la définition, "la pression acoustique efficace" a été remplacée par la "valeur efficace de la pression acoustique", et "la position du" a été ajoutée après "qui existerait à".]

3.3

impédance électrique de transfert

Z_{PH}

<d'un couple de transducteurs dans un coupleur> quotient de la transformée de Fourier de la tension en circuit ouvert $\Im(U_H(t))$ recueillie aux bornes électriques de l'**hydrophone** sur la transformée de Fourier du courant électrique $\Im(I_P(t))$ traversant le **projecteur**, lorsque le **projecteur** et l'**hydrophone** sont placés dans un **coupleur**

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

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 ohms (Ω). L'angle de phase est exprimé en degrés, et représente la différence de phase entre la tension de l'**hydrophone** et le courant du **projecteur**.

Note 2 à l'article: Étant donné que l'**impédance électrique de transfert** dépend des conditions d'environnement, de la pression hydrostatique, de la température de l'eau et de la longueur du câble de liaison du transducteur, ces paramètres, ainsi que la fréquence et le repère des bornes électriques de mesure de l'impédance électrique, sont précisés.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.10, modifiée – Dans le terme, "couple de transducteurs" a été supprimé. Le domaine "<d'un couple de transducteurs dans un coupleur>" a été ajouté. Dans la définition, "rapport complexe de la tension instantanée en circuit ouvert U_H " a été remplacée par "quotient de la transformée de Fourier de la tension en circuit ouvert $\Im(U_H(t))$ ", "au courant instantané I_P " a été remplacé par "sur la transformée de Fourier du courant électrique $\Im(I_P(t))$ ", et "si le **projecteur** et l'**hydrophone** sont placés en champ libre, leurs axes principaux étant alignés et dirigés l'un vers l'autre" a été remplacée par "lorsque le **projecteur** et l'**hydrophone** sont placés dans un **coupleur**".]

3.4

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 mesure. 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, modifiée – Dans la définition, "un **signal** électrique" a été remplacé par "des tensions électriques".]

3.5

pistonphone

appareil dans lequel un piston rigide peut être animé d'un mouvement alternatif de fréquence et d'amplitude connues afin d'obtenir une pression acoustique connue dans une petite chambre fermée

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.20, modifiée – Dans la définition, "et qui permet d'obtenir" a été remplacée par "afin d'obtenir", et "une chambre fermée de petites dimensions" a été remplacée par "une petite chambre fermée".]

3.6

sensibilité en pression

$\underline{M}_p$

<d'un **hydrophone**> quotient de la transformée de Fourier du **signal** de tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** $\Im(U_H(t))$ sur la transformée de Fourier du **signal** de pression acoustique $\Im(p(t))$ établi en moyenne sur l'élément actif de l'**hydrophone**, à une fréquence spécifiée

$$\underline{M}_p = \frac{\Im(U_H(t))}{\Im(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité en pression** d'un **hydrophone** est un paramètre à valeur complexe. Le module de la **sensibilité en pression** d'un **hydrophone** est exprimé en volts par pascal, V/Pa. L'angle de phase de la sensibilité est exprimé en degrés, et représente la différence de phase entre la tension électrique et la pression acoustique.

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

Note 3 à l'article: L'élément actif d'un **hydrophone** est l'élément électroacoustique de l'**hydrophone** sensible à la pression acoustique.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.23, modifiée – Dans la définition, "rapport de la tension de sortie efficace" a été remplacée par "quotient de la transformée de Fourier du **signal** de tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** $\Im(U_H(t))$ ", et "pression acoustique efficace" a été remplacée par "transformée de Fourier de la pression acoustique $\Im(p(t))$ ". La description de l'élément actif d'un **hydrophone** a été intégrée à une Note à l'article.]

3.7

niveau de sensibilité en pression

L_M

vingt fois le logarithme de base 10 du rapport du module de la **sensibilité en pression** $|\underline{M}_p|$ à la sensibilité de référence de M_{ref} , en décibels

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

Note 1 à l'article: La valeur de la sensibilité de référence M_{ref} est 1 V/μPa.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.24, modifiée – Dans la définition, "du module" a été ajoutée avant "de la **sensibilité en pression**", et "en décibels" a été ajoutée après " M_{ref} ".]

3.8

projecteur

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

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.37]

3.9

rapport des chaleurs massiques

γ

rapport des chaleurs massiques à pression et volume constants

Note 1 à l'article: Pour de l'air sec et une température comprise entre 0 °C et 17 °C, $\gamma = 1,40$.

3.10

transducteur réciproque

transducteur électroacoustique linéaire, passif et réversible de sorte que les coefficients de couplage de transduction sont égaux dans toute direction

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.24, modifiée – Dans la définition, "transducteur" a été remplacée par "transducteur électroacoustique" et "de sorte que les coefficients de couplage de transduction sont égaux dans toute direction" a été ajoutée à la fin de la définition.]

3.11

signal

courant électrique, tension, pression acoustique, déplacement de particule acoustique ou autre grandeur de champ concernée, à variation temporelle définie

[SOURCE: En anglais, ISO 18405:2017 [2], 3.1.5.8]

3.12

réponse à l'émission en courant

$S_{l,T}$

<d'un transducteur dans un coupleur> quotient de la transformée de Fourier du **signal** de pression acoustique $\Im(p(t))$ sur la transformée de Fourier du **signal** de courant électrique $\Im(I(t))$ traversant un transducteur T inséré dans le **coupleur** à une fréquence donnée

$$S_{l,T} = \frac{\Im(p(t))}{\Im(I(t))} \quad (4)$$

Note 1 à l'article: La **réponse à l'émission en courant** est exprimée en pascal par ampères, Pa/A.

Note 2 à l'article: À la différence de l'étalonnage en champ libre, aucun terme relatif à la distance n'est exigé ici.

Note 3 à l'article: Le signal de pression acoustique est supposé uniforme dans un **coupleur**.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.36, modifiée – Dans le terme, "**réponse à l'émission** en courant d'un transducteur dans une chambre de petites dimensions" a été remplacée par "**réponse à l'émission en courant**". Le domaine "<d'un transducteur dans un coupleur>" a été ajouté. Dans la définition, "une chambre de petites dimensions" a été remplacée par "un **coupleur**" et "traversant les bornes électriques d'un transducteur à l'intérieur de la chambre" par "traversant un transducteur T inséré dans le **coupleur**". De même, "courant" a été remplacé par "transformée de Fourier du **signal** de courant électrique $\Im(U_H(t))$ ", et "pression acoustique (supposé uniforme)" a été remplacée par "transformée de Fourier du signal de pression acoustique $\Im(p(t))$ ".]

3.13

incertitude

<de mesure> paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007 [3], 2.26]

3.14

colonne vibrante

appareillage dans lequel une colonne d'eau contenue dans un cylindre d'axe vertical est mise en vibration, provoquant ainsi dans la colonne d'eau une pression acoustique variable avec la profondeur

Note 1 à l'article: La longueur de la colonne est suffisamment faible par rapport à la longueur d'onde du son dans l'eau. Le diamètre de la colonne est faible comparé à sa longueur.

[SOURCE: IEC 60565:2006 [1], 3.38]

3.15

nombre d'onde

k

inverse de la longueur d'onde acoustique multipliée par 2π

$$k = 2\pi / \lambda \quad (5)$$

Note 1 à l'article: Le **nombre d'onde** est exprimé en unités par mètre, m^{-1} .

Note 2 à l'article: Dans les différentes branches de la physique, le terme **nombre d'onde** peut être considéré comme égal soit à $2\pi/\lambda$ soit à $1/\lambda$, la valeur $2\pi/\lambda$ étant toutefois préférable dans le domaine technique de l'acoustique. Le terme employé dans l'IEC 60050-103:2009, 103-10-12 est "**nombre d'onde** angulaire".

[SOURCE: IEC 60050-726:1982[4], 726-05-02, modifiée – Dans la définition, "dans un guide, ou de la longueur d'onde d'une onde plane" a été remplacée par "acoustique multipliée par 2π ".]

4 Symboles

C_t	élasticité acoustique de la chambre
C_M	élasticité du milieu
c	vitesse du son dans l'eau
c_f	vitesse du son dans un liquide
d	profondeur ou distance de l' hydrophone
d_{jk}	module piézoélectrique du matériau de la capsule
E	Module de Young
f	fréquence
g	accélération due à la pesanteur
h	variation de la surface de l'eau dans le récipient ouvert
H_e	hauteur équivalente
ΔH	variation du niveau d'eau
I_P	courant traversant le projecteur
I_T	courant traversant le transducteur
I_c	courant de compensation traversant le projecteur d'équilibre

K	constante caractéristique du transducteur d'équilibre piézoélectrique
K_0	facteur de correction de la pression hydrostatique
k	nombre d'onde
L	longueur de la colonne ou du coupleur
L_M	niveau de sensibilité en pression de l' hydrophone
M_H	sensibilité de l' hydrophone
M_p	sensibilité en pression
M_T	sensibilité du transducteur de pression statique
M_M	sensibilité du microphone
p	pression acoustique
p_s	pression statique
Q	facteur de qualité mécanique
r	rayon de la capsule du transducteur
S_P	réponse à l'émission en courant d'un projecteur dans un coupleur
S_T	réponse à l'émission en courant d'un transducteur dans un coupleur
U_C	tension de compensation
U_H	tension en circuit ouvert d'un hydrophone
U_M	tension en circuit ouvert d'un microphone
U_{PH}	tension en circuit ouvert d'un hydrophone , avec un projecteur de source sonore
U_{PT}	tension en circuit ouvert d'un transducteur, avec un projecteur de source sonore
U_{TH}	tension en circuit ouvert d'un hydrophone , avec un transducteur de source sonore
U_R	tension en circuit ouvert d'un hydrophone de référence
u	vitesse du volume
V_b	volume de l'organe subsidiaire
V_t	volume total
ΔV	variation du volume
x_0	amplitude de vibration
Z	contient tous les termes qui impliquent l'impédance de transfert
$\underline{Z}_{AI}$	impédance acoustique
$\underline{Z}_{PH}$	impédance électrique de transfert d'un projecteur et d'un hydrophone dans un coupleur
$\underline{Z}_{PT}$	impédance électrique de transfert d'un projecteur et d'un transducteur dans un coupleur
$\underline{Z}_{TH}$	impédance électrique de transfert d'un transducteur et d'un hydrophone dans un coupleur
$\underline{Z}_{TP}$	impédance électrique de transfert d'un transducteur à un projecteur dans un coupleur
γ	rapport des chaleurs massiques
ρ	densité de l'eau
ρ_f	densité du fluide

- σ coefficient de Poisson
 ω fréquence angulaire
 ω_r fréquence angulaire de résonance

5 Procédures d'étalonnage

5.1 Principes

- a) Étalonnage absolu
Étalonnage sans transducteur de référence
- b) Étalonnage relatif
Étalonnage avec un transducteur de référence étalonné

5.2 Limites de champ

Les champs acoustiques des étalonnages réalisés conformément aux Articles 7 à 12 doivent être limités dans une chambre de petites dimensions.

5.3 Choix schématique des procédures

L'étalonnage doit être effectué par l'une des méthodes suivantes, en fonction des différents principes et de ses limites applicables au champ acoustique et à la bande de fréquences.

- a) L'étalonnage par excitation hydrostatique conformément à l'Article 7 est valable dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à 1 Hz.
- b) L'étalonnage par compensation piézoélectrique conformément à l'Article 8 est valable dans la bande de fréquences de 1,0 Hz à 4 kHz. Toutefois, avec un transducteur de référence, cet étalonnage est habituellement valide dans la bande de fréquences de 1,0 Hz à 2 kHz.
- c) L'étalonnage par réciprocité du **coupleur** acoustique conformément à l'Article 9 est valable dans la bande de fréquences de 0,1 Hz à 5 kHz.
- d) L'étalonnage par **pistonphone** conformément à l'Article 10 avec ou sans transducteur de référence est valable dans la bande de fréquences comprise entre quelques hertz et plusieurs centaines de hertz.
- e) L'étalonnage par **colonne vibrante** conformément à l'Article 11 avec ou sans transducteur de référence est valable dans la bande de fréquences de 10 Hz à 2 kHz.
- f) L'étalonnage par transducteur de pression statique conformément à l'Article 12 avec un transducteur de référence est valable dans la bande de fréquences de 0,5 Hz à 3,15 kHz.

5.4 Compte-rendu des résultats

L'étalonnage de la **sensibilité en pression** ou du **niveau de sensibilité en pression** n'est valable qu'à la date de l'étalonnage et pour les conditions d'environnement présentes au cours de l'étalonnage. Lorsque le résultat de l'étalonnage d'un **hydrophone** est consigné dans un rapport, les conditions d'environnement qui se rapportent à cet étalonnage doivent être indiquées, y compris toutes les conditions qui peuvent influencer la sensibilité du dispositif [5] à [9].

Les conditions à consigner peuvent comprendre les éléments suivants:

- la date de l'évaluation;
- la température de l'eau;
- la profondeur d'immersion (ou pression hydrostatique appliquée);
- la durée de trempage et de toute procédure de mouillage adoptée;
- la pression acoustique maximale à laquelle est soumis l'**hydrophone**;

- toutes les hypothèses émises au sujet du dispositif en essai (par exemple, la position du centre de référence).

L'**incertitude** d'étalonnage doit également être consignée avec la **sensibilité en pression** ou le **niveau de sensibilité en pression**, qui doit être évalué(e) conformément au Guide ISO/IEC 98-3 [10].

Si un **hydrophone** étalonné est utilisé dans un environnement sensiblement différent de celui qui était présent au cours de l'étalonnage, il peut être nécessaire pour l'utilisateur d'augmenter son évaluation des **incertitudes** de mesure, pour prendre en compte la modification de l'environnement.

5.5 Périodes de réétalonnage

Les **hydrophones** doivent être étalonnés périodiquement, afin de maintenir un état d'étalonnage valable. Pour les **hydrophones** de référence, un réétalonnage annuel peut être approprié. Pour les **hydrophones** de mesure utilisés sur le terrain et qui peuvent être soumis à un usage abusif, un étalonnage peut être exigé à des intervalles plus rapprochés.

5.6 Considérations relatives à la température et à la pression pour l'étalonnage

Les propriétés des transducteurs peuvent varier avec la température ambiante et avec la pression hydrostatique (profondeur) [6], [7].

Lorsque la sensibilité d'un transducteur est exigée pour des conditions spécifiques de température de l'eau et de pression hydrostatique (profondeur de l'eau), le transducteur doit être étalonné dans les mêmes conditions de température et de pression dans lesquelles l'**hydrophone** est utilisé, afin de mesurer les champs acoustiques, ou des corrections doivent être apportées à la sensibilité du transducteur et aux valeurs de réponse, d'après les étalonnages antérieurs ou les modèles analytiques validés.

5.7 Préparation des transducteurs

Afin de vérifier que le transducteur est correctement mouillé par l'eau, et qu'aucun film d'air ou qu'aucune bulle n'apparaît à sa surface, un produit mouillant doit être appliqué sur toute sa surface. Après immersion, aucune partie sèche ne doit être visible sur le transducteur retiré de l'eau [8].

6 Mesurages électriques

6.1 Forme du signal

Généralement, la forme d'onde d'excitation utilisée pour l'étalonnage est une onde sinusoïdale entretenue. Dans ce cas, un nombre suffisant de fréquences est choisi afin de vérifier que les performances de l'**hydrophone** sont bien caractérisées sur la bande de fréquences souhaitée. D'autres **signaux** deviennent courants avec le développement de la technologie de mesure, par exemple, les fluctuations de longueur d'onde et le bruit à large bande.

6.2 Mise à la terre

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 de l'**hydrophone** doivent avoir une connexion à la terre unique avec l'écran du câble de ce même **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 utilisées pour le mesurage doivent être spécifiées.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé et constitue une partie intégrante du système de mesure, ces éléments doivent être étalonnés.

6.3.2 Charge électrique par l'appareil de mesure

Au cours des mesurages, l'**hydrophone** doit être connecté à un appareil de mesure à impédance d'entrée électrique élevée (amplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur). Généralement, l'impédance d'entrée électrique doit être bien supérieure à l'impédance électrique de l'**hydrophone** (en théorie, plus de 100 fois supérieure). Lorsque l'impédance électrique de l'**hydrophone** est élevée (par exemple pour un **hydrophone** piézoélectrique de petites dimensions et de faible capacité électrique), la charge électrique de l'**hydrophone** due à l'appareil de mesure doit être prise en considération. Dans ce cas, les corrections de la charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée, afin d'obtenir la tension en circuit ouvert.

NOTE 1 Les corrections peuvent être calculées à l'aide de la procédure indiquée dans l'IEC 60565-1.

NOTE 2 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.

6.3.3 Charge électrique par le câble prolongateur

Si un câble prolongateur est relié à l'**hydrophone**, ce câble appliquera une charge électrique sur celui-ci, et une correction doit être appliquée afin d'obtenir la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone**.

NOTE 1 Les corrections à de basses fréquences doivent être calculées à l'aide de la procédure indiquée dans l'IEC 60565-1. Pour une fréquence élevée, les corrections peuvent utiliser la méthode développée par Hayman, et al., voir [11].

NOTE 2 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.

6.3.4 Diaphonie et interférences acoustiques

En présence d'interférences et de diaphonie, le calcul de la moyenne des **signaux** et le filtrage à bande étroite n'entraînent pas en général une amélioration de l'exactitude. Par conséquent, des efforts doivent être entrepris pour déterminer la cause du problème et des mesures doivent être prises pour réduire le plus possible les effets. Les niveaux d'interférence acoustique inférieurs au moins de 30 dB aux niveaux des **signaux**, ou au moins de 40 dB à ces mêmes niveaux pour un **signal** à ondes entretenues ne sont pas susceptibles de remettre en cause l'**incertitude** de mesure.

6.3.5 Préamplificateur intégré

Lorsqu'un **hydrophone** possède un préamplificateur intégré, la sensibilité est exprimée comme la sensibilité d'extrémité de câble, y compris la performance du préamplificateur.

NOTE Lorsqu'un **hydrophone** possède un préamplificateur intégré qui correspond à l'impédance électrique du système de mesure, une correction de la charge électrique par les câbles prolongateurs ou les appareils de mesure est inutile.

6.4 Mesurage du courant traversant le projecteur

Le courant traversant le **projecteur** doit être déterminé par une pince de courant étalonnée, par un transformateur de courant étalonné (produisant une tension proportionnelle au courant

d'attaque), ou en mesurant la chute de tension à travers une petite résistance étalonnée (valeur de quelques ohms uniquement) en série avec le **projecteur**.

7 Étalonnage par excitation hydrostatique

7.1 Généralités

Cette méthode d'étalonnage des **hydrophones** sans transducteur de référence s'applique pour la bande de fréquences de 0,01 Hz à 1 Hz par une pression hydrostatique variant de façon harmonique. Elle consiste en un étalonnage absolu des hydrophones effectué dans une chambre de petites dimensions [12] à [14]. Pour la mise en œuvre décrite ici, cette méthode d'étalonnage fournit une valeur du module de sensibilité de l'**hydrophone** uniquement.

7.2 Principe

7.2.1 Détermination de la pression alternative

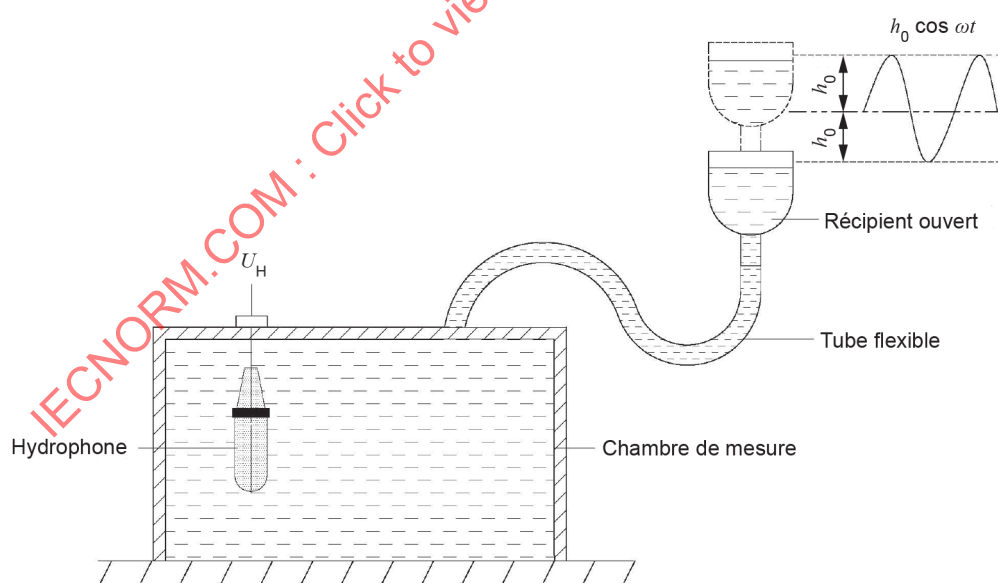
Connecter une chambre fermée de petites dimensions à un récipient ouvert, de sorte que le niveau de l'eau dans le récipient soit toujours supérieur à celui de la chambre. Le récipient ouvert est déplacé verticalement à une fréquence harmonique (voir Figure 1). La variation de la surface de l'eau dans le récipient ouvert h peut être exprimée comme suit:

$$h = h_0 \cos \omega t \quad (6)$$

où

h_0 est l'amplitude de variation de la surface de l'eau;

ω est la fréquence angulaire de la vibration.



IEC

Figure 1 – Schéma d'étalonnage par excitation hydrostatique

La variation du niveau d'eau dans le récipient ouvert produit une pression alternative p dans la chambre fermée:

$$p = p_0 \cos \omega t \quad (7)$$

où

p_0 est l'amplitude de la pression sinusoïdale alternative.

NOTE Dans la pratique, aucun délai apparent ne peut être contrôlé lorsque le récipient ouvert est déplacé verticalement à une fréquence harmonique.

La pression alternative p est utilisée comme pression équivalente pour étalonner les **hydrophones**. À des fréquences basses (inférieures à 0,5 Hz), son amplitude est calculée selon l'équation suivante:

$$p_0 = \rho g h_0 \quad (8)$$

où

ρ est la densité de l'eau;

g est l'accélération due à la pesanteur.

À des fréquences élevées, la pression alternative p est influencée à la fois par la résonance de Helmholtz du système et par l'inertie de l'eau dans le récipient ouvert et le tube de raccordement. La résonance du système augmente la pression alternative, et l'inertie de l'eau réduit la pression hydrostatique alternative. En conséquence, l'amplitude de la pression alternative dans la chambre de mesure est alors déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$p_0 = \rho g h_0 K_0 \left(1 - \frac{\omega^2}{g} H_e \right) \quad (9)$$

où

K_0 est le facteur de correction de la pression qui augmente la pression alternative;

H_e est la hauteur équivalente influencée par l'inertie de l'eau dans le récipient et dans le tube.

7.2.2 Détermination du facteur de correction

À des fréquences très basses, la résonance de Helmholtz du système est décrite à l'aide des paramètres localisés unidimensionnels. La valeur du facteur de correction K_0 doit être calculée par l'expression:

$$K_0 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{Q \omega_r} \right)^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right)^2} \quad (10)$$

où

ω_r est la fréquence angulaire de résonance du système;

Q est le facteur de qualité mécanique.

Dans les conditions de $\omega_r \gg \omega$ et $Q > 2$, l'Équation (10) peut être exprimée avec une précision suffisante, comme suit:

$$K_0 \approx 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \quad (11)$$

La fréquence angulaire de résonance ω_r doit être mesurée et vérifiée après réalisation du système d'étalonnage. À cet effet, un **projecteur** piézoélectrique est monté au fond de la chambre de mesure et entraîné par un générateur de **signaux** de balayage dans la bande de fréquences contenant la fréquence de résonance. Un **hydrophone** avec une sensibilité constante sur cette bande de fréquences est installé dans la chambre et sa tension de sortie en circuit ouvert est mesurée. La fréquence angulaire de résonance la plus basse du **projecteur** et de l'**hydrophone** doit être bien supérieure à ω_r . La fréquence de résonance angulaire du système peut être déterminée selon la réponse en fréquence de la tension de sortie de l'**hydrophone**.

7.2.3 Détermination de la hauteur équivalente

7.2.3.1 Généralités

La hauteur équivalente H_e doit être déterminée conformément à 7.2.3.2, 7.2.3.3 ou 7.2.3.4 [15].

7.2.3.2 Méthode de mise à zéro de la pression alternative

La pression alternative dans la chambre de mesure peut être ajustée à zéro par deux méthodes différentes.

- a) En ajoutant ou en retirant l'eau dans le récipient ouvert pour modifier le niveau de l'eau, la pression alternative p dans la chambre de mesure peut être ajustée à zéro à une fréquence angulaire spécifiée ω_0 . À partir de l'Équation (9), la hauteur équivalente est à présent donnée par:

$$H_e + \Delta H = \frac{g}{\omega_0^2} \quad (12)$$

où

ΔH est la modification du niveau de l'eau.

Le niveau de l'eau varie à nouveau d'une quantité $-\Delta H$ pour que la hauteur équivalente retrouve sa valeur d'origine. La hauteur équivalente est ensuite donnée par:

$$H_e = \frac{g}{\omega_0^2} - \Delta H \quad (13)$$

- b) En maintenant le niveau de l'eau dans le récipient ouvert à une hauteur appropriée, la pression alternative dans la chambre de mesure peut être ajustée à zéro en faisant varier la fréquence. La hauteur équivalente est à présent égale à g/ω_0^2 , où ω_0 est la fréquence angulaire à laquelle la pression alternative atteint le niveau zéro. Dans cette méthode, le niveau de l'eau du récipient ouvert doit être suffisant pour vérifier que ω_0 est supérieure à la fréquence angulaire limite supérieure de la plage d'étalonnage. Si le niveau de l'eau varie d'une quantité $-\Delta H$ pour que la pression alternative retrouve une valeur appropriée, la hauteur équivalente à ce point peut être obtenue à l'aide de l'Équation (13).

7.2.3.3 Méthode de la variation du niveau de l'eau

Le niveau de l'eau dans le récipient ouvert étant à une certaine hauteur H_e , et le récipient ouvert vibrant verticalement à une fréquence angulaire ω , mesurer l'amplitude de tension en circuit ouvert U_{H1} d'un **hydrophone** dans la chambre de mesure. Modifier le niveau d'eau du récipient ouvert d'une quantité ΔH , puis mesurer l'amplitude de tension en circuit ouvert de

l'**hydrophone**, U_{H2} . Ces deux mesurages doivent permettre de déterminer ensuite la hauteur équivalente selon l'Équation (14):

$$H_e = \frac{g}{\omega^2} + \frac{U_{H1}\Delta H}{U_{H2} - U_{H1}} \quad (14)$$

Il convient de mesurer les deux amplitudes de tension U_{H1} et U_{H2} selon la même méthode, par exemple comme valeurs efficaces ou comme valeurs de crête.

NOTE ΔH a une valeur positive lorsque le niveau de l'eau augmente et une valeur négative lorsque le niveau de l'eau diminue.

7.2.3.4 Méthode des deux fréquences

Le récipient ouvert vibrant dans un premier temps à la fréquence angulaire ω_1 puis à la fréquence angulaire ω_2 (ω_1 et ω_2 doivent être proches l'une de l'autre, différant de moins de 0,6 rad/s), mesurer les tensions en circuit ouvert correspondantes U_{H1} et U_{H2} de l'**hydrophone** dans la chambre fermée. Les hypothèses suivantes doivent être formulées.

- La sensibilité de l'**hydrophone** est quasiment la même à deux fréquences angulaires proches, qui sont bien inférieures à la fréquence angulaire de résonance de l'**hydrophone**.
- L'**hydrophone** subit quasiment la même influence de la résonance de Helmholtz du système à deux fréquences angulaires rapprochées. Dans ce cas, la hauteur équivalente est donnée par l'expression:

$$H_e = g \frac{U_{H2}U_{H1}}{U_{H2}\omega_1^2 - U_{H1}\omega_2^2} \quad (15)$$

NOTE La méthode de mise à zéro de la pression alternative est la plus précise des trois méthodes. Cependant, dans la mesure où cette méthode exige que la fréquence pour le niveau zéro de pression soit au-delà de la bande de fréquences d'étalonnage, il est nécessaire que le dispositif de vibration fonctionne sur une bande de fréquences plus étendue. La méthode des deux fréquences est la plus convenable. Si l'hypothèse liée est satisfaite, cette méthode est également très précise.

7.2.4 Calcul de la sensibilité en pression de l'hydrophone

Le module de la **sensibilité en pression** $|M_p|$ d'un **hydrophone** placé dans la chambre de mesure (voir Figure 1) concernant l'amplitude de la tension en circuit ouvert U_{H0} doit être calculé par:

$$|M_p| = \frac{U_{H0}}{p_0} \quad (16)$$

7.3 Conception du système de vibration

La conception du système de vibration doit tenir compte des éléments suivants.

- Étant donné que la variation du niveau de l'eau h est liée à la pression équivalente p , son amplitude h_0 doit être suffisamment élevée pour fournir une pression équivalente suffisamment élevée, afin d'assurer un rapport de mesure **signal/bruit**. Cependant, pour que le système continue à vibrer régulièrement à une fréquence proche de la fréquence limite supérieure, le déplacement de vibration h_0 ne doit pas être trop élevé. Dans la pratique, un déplacement de vibration de 20 mm est un déplacement approprié.
- Dans la pratique, la condition suivante de la fréquence angulaire de résonance de Helmholtz du système, $\omega_r \geq 20\omega$, se composant de la vibration de la chambre de mesure, du tuyau souple et du récipient ouvert, doit être satisfaite afin de vérifier que

$$K_0 \approx 1 \quad (17)$$

- c) Le système d'étalonnage doit être conçu et installé de manière à réduire le plus possible l'influence de toute vibration parasite du dispositif mobile sur le récipient ouvert. Toutes les précautions nécessaires doivent être prises, afin d'éviter le couplage direct de toute vibration.
- d) Afin d'assurer un mouvement uniforme de l'eau, l'accélération du récipient ouvert doit être inférieure à l'accélération due à la pesanteur. Cette condition peut être exprimée comme suit:

$$\omega^2 h_0 << g \quad (18)$$

NOTE Un pot vibrant électrodynamique disponible dans le commerce ne fonctionnant généralement pas avec une basse fréquence de ce type, il est nécessaire de concevoir et de fabriquer un système de vibration particulier. Une méthode consiste à convertir le mouvement rotatif en vibration harmonique verticale, un moteur pas-à-pas étant utilisé généralement pour un contrôle précis de la vitesse de rotation. De plus, afin d'éviter le point de résonance du dispositif mobile à une fréquence basse et afin de maintenir le déplacement régulier du récipient ouvert dans l'axe vertical, une solution adaptée consiste à utiliser des moteurs pas-à-pas doubles, entraînés en mode différentiel.

7.4 Autre méthode pour l'excitation hydrostatique

La pression hydrostatique peut également être modifiée en faisant varier la profondeur d'immersion de l'**hydrophone** avec un mouvement harmonique simple. Dans ce cas, l'amplitude de la pression alternative p_0 est donnée par l'Équation (8) et le module de la **sensibilité en pression** $|M_p|$ est calculé à partir de l'Équation (16).

Cette méthode d'excitation hydrostatique introduit des sources d'**incertitude** supplémentaires, y compris:

- l'écoulement hydrodynamique autour de l'**hydrophone**. Ceci dépend de la forme de l'**hydrophone**.
- les effets inertiels du milieu. Ces effets peuvent être réduits le plus possible par une orientation adéquate de l'**hydrophone**, afin de réduire le déplacement de l'eau à proximité de la face active. Par exemple, les **hydrophones** avec des faces actives planes peuvent être orientés avec la face de l'hydrophone dans un plan vertical.
- les effets inertiels à l'intérieur de l'**hydrophone**. Ces effets peuvent également être réduits le plus possible par l'orientation, bien que l'orientation optimale puisse ne pas être la même que celle qui réduit le plus possible les effets inertiels du milieu.
- la pression dynamique par turbulence indésirable. Cette pression peut être réduite le plus possible en lissant autant que possible toutes les fixations. Il est également possible que le mouvement harmonique de l'**hydrophone** puisse exciter une résonance dans l'eau à l'intérieur de la chambre d'étalonnage.

7.5 Incertitude

Il est prévu que l'**incertitude** élargie globale de l'étalonnage à des fréquences comprises entre 0,05 Hz et 0,5 Hz puisse être inférieure à 0,3 dB (niveau de confiance à 95 %) en effectuant l'essai minutieusement. Toutefois, l'**incertitude** atteint 0,5 dB (niveau de confiance à 95 %) aux extrémités supérieure et inférieure de la bande de fréquences. Dans le cas de la méthode alternative, il est prévu que l'**incertitude** élargie globale de l'étalonnage puisse être inférieure à 0,7 dB (niveau de confiance à 95 %) en effectuant l'essai minutieusement [12], [16].

8 Étalonnage par compensation piézoélectrique

8.1 Généralités

Cette méthode d'étalonnage des **hydrophones** s'applique à la bande de fréquences de 1,0 Hz à 4 kHz par compensation piézoélectrique, la méthode d'étalonnage des **hydrophones** avec un transducteur de référence s'appliquant toutefois à la bande de fréquences de 1,0 Hz à 2 kHz. L'étalonnage est effectué dans une chambre fermée de petites dimensions remplie d'eau, sa longueur d'onde étant suffisamment plus grande que sa dimension la plus grande [16] à [20]. Pour la mise en œuvre décrite ici, cette méthode d'étalonnage fournit une valeur du module de sensibilité de l'**hydrophone** uniquement.

8.2 Principe

8.2.1 Détermination de la pression acoustique

Placer l'**hydrophone** dans une cuve fermée remplie d'eau, équipée d'un **projecteur** et d'un transducteur d'équilibre piézoélectrique, à proximité du centre géométrique du transducteur (voir Figure 2). Le transducteur d'équilibre se compose de deux capsules cylindriques coaxiales en céramique piézoélectrique. La capsule intérieure est le transducteur excitateur, alors que la capsule extérieure est le capteur de déplacement. Le petit espace annulaire entre les capsules est rempli d'une matière de couplage élastique. Mesurer la valeur de la pression alternative produite par le **projecteur** dans la cuve, à l'aide du transducteur d'équilibre.

Ajuster la phase et l'amplitude de la tension U_c aux bornes électriques de la capsule excitatrice du transducteur d'équilibre par rapport à la tension alimentant le **projecteur**, de façon que la tension de sortie de la capsule extérieure soit égale à zéro. Utiliser le même générateur de **signaux** qui alimente le **projecteur** et la capsule excitatrice.

Pour les fréquences supérieures à 1 kHz, la chambre d'étalonnage doit être conforme à 8.3.2.

Lorsque les influences simultanées du **projecteur** et de la capsule excitatrice du transducteur d'équilibre se neutralisent, le déplacement de la capsule extérieure est égal à zéro, et la pression acoustique à proximité du transducteur d'équilibre est alors égale à:

$$p = K(d_{jk}, E, r) U_c \quad (19)$$

où

$K(d_{jk}, E, r)$ est une constante caractéristique du transducteur d'équilibre piézoélectrique;

d_{jk} est le module piézoélectrique du matériau de la capsule;

E est le module de Young du matériau de la capsule;

r est le rayon moyen de la capsule du transducteur d'excitation;

U_c est la tension de compensation à la fréquence f .

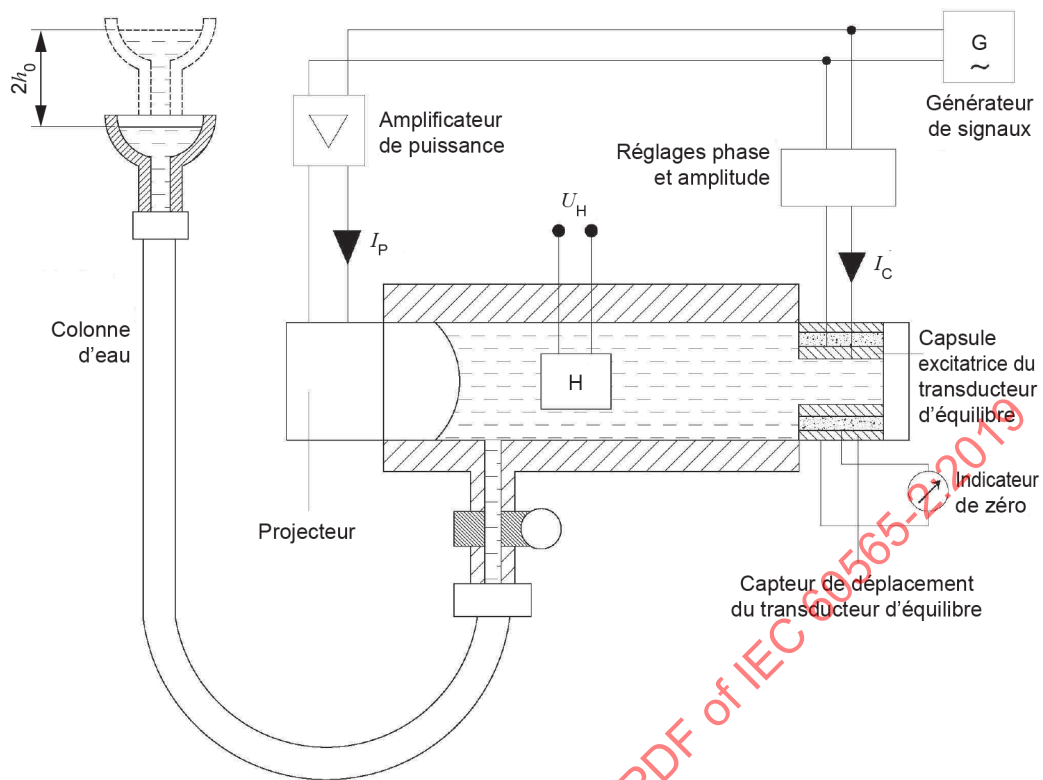


Figure 2 – Schéma d'étalonnage par compensation piézoélectrique

8.2.2 Détermination de la constante caractéristique

La constante caractéristique $K(d_{jk}, E, r)$ est généralement indépendante de la fréquence. Elle est déterminée expérimentalement en faisant varier harmoniquement le niveau de l'eau au-dessus du transducteur d'équilibre d'une amplitude h_0 et en compensant la déformation résultante du transducteur d'équilibre au moyen d'une tension de compensation d'une amplitude U_{c0} appliquée au transducteur d'équilibre (voir Figure 2). Cette tension de compensation doit avoir la même fréquence que le mouvement du niveau de l'eau. Elle doit être déduite soit à partir de l'oscillateur qui commande la variation du niveau de l'eau, soit à partir d'un capteur de pression qui transforme la variation harmonique du niveau de l'eau en une tension alternative.

Pour cette opération, la cavité de la cuve de mesure est reliée par un tube flexible à un récipient ouvert, fixé sur un pot vibrant, communiquant des oscillations sinusoïdales verticales d'une amplitude connue. La fréquence vibratoire doit être suffisamment basse (0,3 Hz) pour que les forces d'inertie apparaissant dans le liquide vibrant soient négligeables.

La phase et l'amplitude de la tension de compensation U_{c0} sont ajustées jusqu'à ce que le déplacement du transducteur d'équilibre soit égal à zéro.

Ainsi:

$$K(d_{jk}, E, r) = \frac{p_0}{U_{c0}} = \frac{\rho g h_0}{U_{c0}} \quad (20)$$

8.2.3 Calcul de la sensibilité en pression de l'hydrophone

Le module de **sensibilité en pression** $|M_{p,H}|$ de l'**hydrophone** H concernant la tension en circuit ouvert U_H est égal à:

$$|M_{p,H}| = \frac{U_H U_{c0}}{\rho g h_0 U_c} \quad (21)$$

8.3 Conception de la chambre d'étalonnage

8.3.1 Généralités

Selon la bande de fréquences, la méthode de compensation piézoélectrique utilise deux types de chambres: une chambre pour les basses fréquences et une chambre pour les hautes fréquences.

8.3.2 Chambre pour basses fréquences

La chambre pour basses fréquences doit être construite à partir d'une section de tuyau dont les deux extrémités comportent des couvercles. Un **projecteur** et un transducteur d'équilibre doivent être montés sur les couvercles (voir Figure 2). Les centres géométriques des transducteurs doivent être situés dans le même plan horizontal.

Le **projecteur** doit fournir un niveau de pression suffisamment élevé permettant d'obtenir un rapport **signal**/bruit suffisant.

Les précautions suivantes doivent être prises.

- La cuve doit être conçue de telle sorte que l'air emprisonné puisse être aisément évacué.
- L'élasticité acoustique des parois de la cuve doit être inférieure à celle du volume d'eau.
- Un assemblage par cale et rainure de cale ou une garniture métallique est préférable à des joints ayant une plus grande élasticité.
- La conception de la cuve et le montage du **projecteur** doivent permettre de réduire le plus possible l'excitation des modes de vibration en flexion des parois de la cuve.
- Toutes les mesures nécessaires sont prises pour éviter l'influence de toute vibration de la cuve sur le transducteur d'équilibre et l'**hydrophone**.

Afin de contrôler les conditions ambiantes, la cuve doit être équipée de dispositifs de dégazage, de circulation et de pressurisation de l'eau, ainsi que de dispositifs de contrôle de sa température. L'**hydrophone** à mesurer et le transducteur d'équilibre piézoélectrique doivent être installés comme des éléments séparés.

8.3.3 Chambre pour hautes fréquences

La chambre pour hautes fréquences doit être telle que représentée à la Figure 3. Les dimensions linéaires doivent être réduites le plus possible afin d'augmenter la fréquence limite supérieure au-delà de 1 kHz.

Le transducteur d'équilibre piézoélectrique doit se composer de deux capsules concentriques cylindriques en céramique piézoélectrique pressées entre deux rebords massifs. L'espace entre les deux cylindres doit être rempli d'un matériau élastomère non conducteur. Le transducteur d'équilibre doit former la paroi cylindrique de la chambre, et la cavité de mesure de la chambre ne doit pas être plus grande que le volume interne de la capsule intérieure. La pression alternative est produite par le **projecteur**, qui est un **projecteur** piézoélectrique en céramique placé au fond de la chambre. Ce **projecteur** doit fournir un niveau de pression suffisamment élevé pour assurer un rapport suffisamment grand du **signal** mesuré au bruit.

Placer l'**hydrophone** sur le couvercle de la chambre. Les mêmes précautions doivent être prises dans la conception de la chambre pour hautes fréquences que celles spécifiées en 8.3.2 pour la chambre pour basses fréquences. En outre, des précautions doivent être prises pour diminuer l'influence de la déformation longitudinale des capsules piézoélectriques, produite par l'effet piézoélectrique transversal, sur la tension de sortie du capteur de déplacement. Le transducteur d'équilibre et ses connexions électriques doivent être correctement blindés.

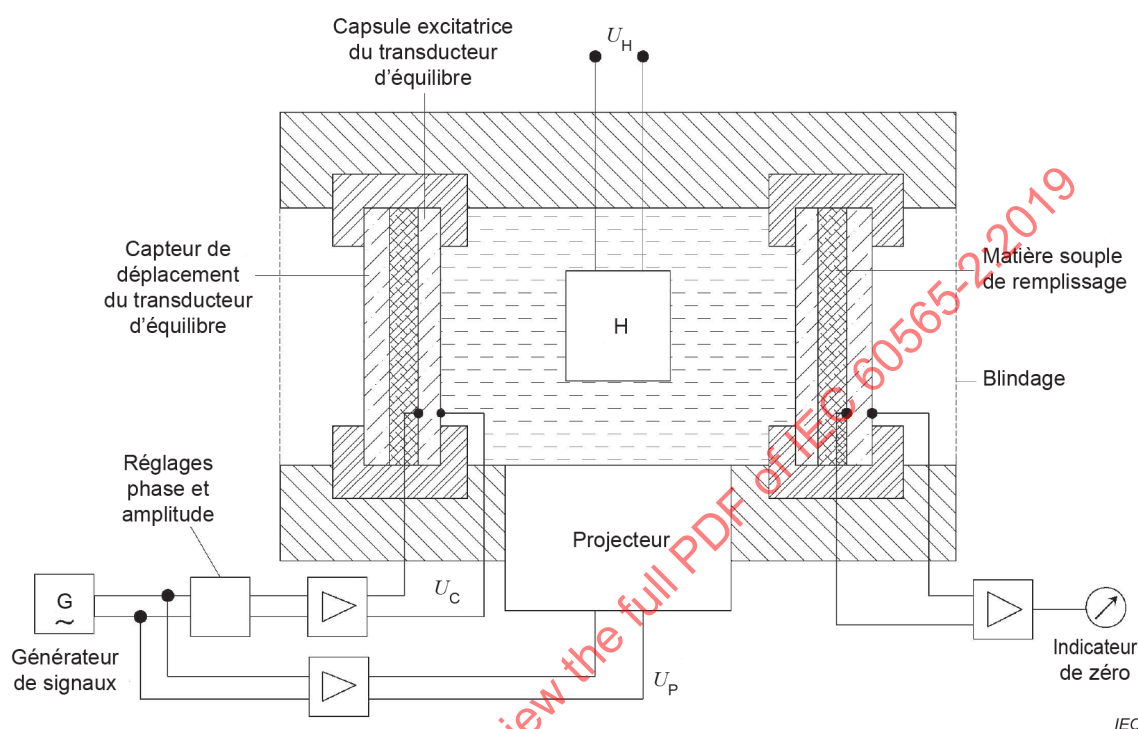


Figure 3 – Schéma de la chambre pour hautes fréquences

8.4 Limites pratiques de la méthode de compensation piézoélectrique

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences supérieures à la fréquence limite supérieure, qui est imposée par les ondes stationnaires qui peuvent apparaître dans la chambre aux fréquences supérieures à 1 kHz. Les ondes stationnaires créent une répartition de pression non uniforme dans la chambre, de sorte que le niveau de sortie de l'**hydrophone** dépend de sa position dans la chambre.

Indépendamment de la construction de la chambre, le système ne doit pas être utilisé au-delà d'une fréquence située à environ deux tiers de la fréquence de résonance fondamentale de la cavité de la cuve.

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences inférieures à la limite de basse fréquence, qui est imposée par la perte de sensibilité du capteur de déplacement piézoélectrique, provenant de sa propre résistance de fuite et de la résistance de charge de l'entrée de l'indicateur de zéro.

NOTE 1 Cette méthode, moyennant une conception adaptée de la chambre, permet de couvrir une bande de fréquences de 1 Hz à 4 kHz.

NOTE 2 Si l'**hydrophone** est symétrique, il peut être positionné dans la chambre de telle sorte que les plans de symétrie acoustique du transducteur d'équilibre et de l'**hydrophone** coïncident. De cette manière, l'influence des ondes stationnaires sur le résultat d'étalonnage est réduite le plus possible et la bande de fréquences peut être étendue [17].

NOTE 3 Le plan de symétrie acoustique est le plan pour lequel les écarts possibles de la pression acoustique s'exerçant sur différentes parties du transducteur, par rapport à sa valeur moyenne, se compensent.

NOTE 4 Dans la pratique, le plan de symétrie acoustique du transducteur d'équilibre coïncide avec le plan de symétrie géométrique. Ce principe vaut également pour un simple **hydrophone** omnidirectionnel si les surfaces de la face active des côtés opposés du plan sont égales, ainsi que les sensibilités localisées de ces surfaces.

8.5 Méthode d'étalonnage relatif

Cette méthode utilise un **projecteur** pour produire le champ de pression acoustique dans la chambre fermée, avec insertion simultanée ou alternative d'un transducteur étalonné et de l'**hydrophone** inconnu dans la chambre. La bande de fréquences d'étalonnage appliquée est de 1 Hz à 2 kHz.

Le module de la **sensibilité en pression** $|M_{p,H}|$ de l'**hydrophone** à étalonner doit être calculé à partir de l'Équation (22):

$$|M_{p,H}| = \frac{U_H}{U_0} |M_{p,R}| \quad (22)$$

où

U_H est la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** à étalonner;

U_R est la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** de référence;

$|M_{p,R}|$ est le module de la **sensibilité en pression** de l'**hydrophone** de référence.

Les limites sont conformes à 8.3. Le mode opératoire de mesure est simple et pratique. Il s'agit d'une méthode répandue qui peut être utilisée pour un étalonnage dans la bande de fréquences de 1 Hz à 2 kHz. En cas d'insertion alternative du transducteur étalonné et de l'**hydrophone** inconnu dans la chambre, ils doivent être identiques. À défaut, d'autres sources d'**incertitude** apparaissent en raison de conditions différentes dans la chambre (variation de flexibilité, pénétration de bulles d'air, etc. lors de la réinstallation des **hydrophones**).

8.6 Incertitude

Si les conditions indiquées en 8.3 sont satisfaites, l'étalonnage par la méthode de compensation piézoélectrique est équivalent à un étalonnage en champ libre, avec une **incertitude** élargie globale possible inférieure à 0,5 dB (niveaux de confiance à 95 %) en effectuant l'essai minutieusement. Jusqu'à des fréquences correspondant environ au cinquième de la fréquence de résonance la plus basse de la chambre, l'**incertitude** élargie globale de l'étalonnage peut être inférieure à 0,3 dB (niveaux de confiance à 95 %). Dans le cas de la méthode d'étalonnage relatif, il est prévu que l'**incertitude** élargie globale puisse être inférieure à 1,2 dB (niveaux de confiance à 95 %).

9 Étalonnage par réciprocité du coupleur acoustique

9.1 Généralités

Cette méthode d'étalonnage des **hydrophones** sans transducteur de référence s'applique pour la bande de fréquences de 0,1 Hz à 5 kHz par réciprocité du **coupleur** acoustique. Elle consiste en un étalonnage absolu des **hydrophones** effectué dans un **coupleur** par application du principe de réciprocité [21] à [23]. Cette méthode permet de déterminer les sensibilités des **hydrophones** selon la température et la pression statique. Pour la mise en œuvre décrite ici, cette méthode d'étalonnage fournit une valeur du module de sensibilité de l'**hydrophone** uniquement.

9.2 Principe

9.2.1 Théorie de la réciprocité du coupleur acoustique

La disposition des transducteurs dans un **coupleur** pour l'étalonnage par réciprocité doit être conforme à la Figure 4. Un **transducteur réciproque** T, une source sonore électroacoustique linéaire P et un **hydrophone** H sont installés dans un **coupleur** à remplissage de fluide. Mesurer le module de l'**impédance électrique de transfert** à un certain nombre de fréquences dans la bande de fréquences concernée, en utilisant le **transducteur réciproque** comme **projecteur** et l'**hydrophone** comme récepteur, ou en utilisant la source sonore comme **projecteur** et alternativement le **transducteur réciproque** et l'**hydrophone** comme récepteurs. À partir des trois impédances de transfert mesurées à chaque fréquence, la **sensibilité en pression** M_p de l'**hydrophone** peut être calculée.

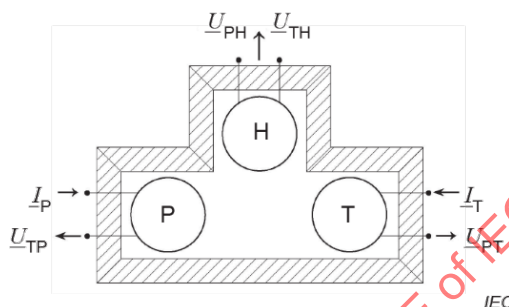


Figure 4 – Coupleur de réciprocité avec trois transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T et un hydrophone H à étalonner

9.2.2 Procédures d'étalonnage par réciprocité

L'Article A.1 indique la dérivation des équations applicables à la sensibilité des trois dispositifs.

Le module de la **sensibilité en pression** $|M_{p,H}|$ de l'**hydrophone** H est calculé à partir de l'équation:

$$|M_{p,H}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (23)$$

où C_t est l'élasticité acoustique totale du **coupleur** (9.2.4).

Les modules de la **sensibilité en pression** $|M_{p,T}|$ et de la **réponse à l'émission en courant** $|S_{i,T}|$ du transducteur T sont calculés à partir des Équations (24) et (25):

$$|M_{p,T}|^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (24)$$

$$|S_{i,T}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (25)$$

De même, le module de la **réponse à l'émission en courant** $|S_{i,P}|$ du **projecteur** P est donné par:

$$|S_{1,P}|^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (26)$$

NOTE 1 Une meilleure précision statistique est obtenue et la réciprocité peut être vérifiée lorsque deux transducteurs ou plus sont réciproques. Si, par exemple, le **projecteur** P peut aussi être utilisé comme **hydrophone**, le module de l'**impédance électrique de transfert** $|Z_{TP}|$ peut aussi être déterminé. Le principe de réciprocité permet alors de démontrer que $|Z_{TP}|$ est égale à $|Z_{PT}|$. Ainsi, $|Z_{PT}|$ peut aussi être obtenue deux fois, une fois en utilisant P comme **projecteur** et T comme **hydrophone** et une seconde fois en utilisant T comme **projecteur** et P comme **hydrophone**. Toute différence entre ces deux valeurs, pour une même fréquence angulaire, est le signe d'un défaut de réciprocité ou de linéarité, ou peut provenir d'une erreur de mesure. L'**incertitude** de la valeur moyenne est généralement inférieure à celle de chaque valeur prise séparément.

NOTE 2 Si l'étalonnage est effectué avec plus de trois transducteurs, et si deux au moins sont réciproques, l'**incertitude** est en général réduite parce que la sensibilité peut être calculée plusieurs fois à partir de résultats indépendants provenant de différentes associations de transducteurs. La valeur moyenne de tous les résultats, à une même fréquence, présente une **incertitude** statistique inférieure à celle de chaque valeur prise séparément.

9.2.3 Calcul de l'impédance de transfert

L'**impédance électrique de transfert** entre un dispositif d'émission (**projecteur** ou **transducteur réciproque**) et un dispositif de réception (**hydrophone** ou **transducteur réciproque**) est calculée à partir des valeurs mesurées du courant dans le dispositif d'émission et de la tension dans le dispositif de réception (3.3).

Pour obtenir la précision la plus élevée, le courant doit être mesuré à travers le même canal de mesure que la tension de réception (le canal de mesure se compose généralement d'un amplificateur, d'un filtre, d'un numériseur, etc.).

NOTE 1 Dans ce dernier cas, les appareils utilisés dans le canal de mesure n'exigent pas un étalonnage absolu.

NOTE 2 Lorsque cela est exigé, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant traversant le **projecteur** avec la tension de l'**hydrophone**. Cette opération réduit le plus possible les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Dans la mesure où cette impédance dépend des conditions de champ et des conditions de charge électrique du **projecteur** et de l'**hydrophone**, ces conditions, ainsi que les bornes électriques auxquelles la tension et le courant sont mesurés sont spécifiées.

9.2.4 Détermination de l'élasticité acoustique

Si le **coupleur** et les transducteurs dans le **coupleur** sont rigides et si le volume V_f du fluide dans le **coupleur** est connu avec précision, l'élasticité acoustique est alors donnée par:

$$C_t = \frac{V_f}{\rho_f c_f^2} \quad (27)$$

où

ρ_f est la densité du fluide;

c_f est la vitesse du son dans le fluide.

Pour obtenir la précision la plus élevée, l'élasticité des parois du **coupleur** et les transducteurs dans le **coupleur** doivent être pris en compte. Les joints d'étanchéité élastiques doivent être conçus de façon à ce qu'ils ne soient pas exposés au champ acoustique dans le **coupleur**. L'élasticité des éléments actifs des transducteurs électroacoustiques dans le **coupleur** doit être calculée à partir des propriétés publiées des matériaux, ou elle doit être mesurée dans le **coupleur** à l'aide de la méthode mise au point par McKinney et al. [24].

NOTE Pour obtenir la précision la plus élevée, l'élasticité des parois du **coupleur** peut être calculée à l'aide des méthodes des éléments finis.

Les composants filetés qui soutiennent la pression interne du **coupleur** à l'aide de filetages grossiers et de grande taille doivent être évités, étant donné qu'ils ne fournissent pas une condition aux limites bien définie.

9.3 Limites de la réciprocité du coupleur acoustique

9.3.1 Limite de fréquence

9.3.1.1 Limite de haute fréquence

La limite de haute fréquence est déterminée par la dimension intérieure maximale du **coupleur**. Lorsque cette dimension dépasse un dixième de la longueur d'onde, la pression acoustique dans le **coupleur** ne peut plus être considérée comme uniforme et l'étalonnage n'est plus valable.

NOTE Dans certains cas, il est possible de calculer le champ acoustique à l'intérieur du **coupleur** et de le corriger, en augmentant ainsi la fréquence limite supérieure. À une fréquence 5 kHz, la dimension maximale pour un **coupleur** rempli d'eau est de 30 mm.

9.3.1.2 Limite de basse fréquence

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences inférieures à la limite de basse fréquence pour le **coupleur**.

NOTE Il n'existe pas de limite de basse fréquence théorique. Dans la pratique, les problèmes électriques liés à l'entraînement d'un **projecteur** piézoélectrique de petites dimensions avec une impédance électrique très élevée signifient toutefois que la limite la plus basse en pratique est de 0,1 Hz pour un **coupleur** conçu pour une utilisation jusqu'à quelques centaines de hertz. Un **coupleur** plus petit destiné à être utilisé à une fréquence plus élevée a des limites de basse fréquence qui sont proportionnellement plus élevées.

9.3.2 Limite applicable aux hydrophones

Le **coupleur** ne doit pas être utilisé pour étalonner des **hydrophones** de grandes dimensions, directionnels ou acoustiquement souples, ou pour étalonner des **hydrophones** à proximité de la résonance.

Il convient que les **hydrophones** qui peuvent être étalonnés dans le **coupleur** de réciprocité puissent être montés dans un **coupleur**, de façon à ce qu'ils forment une limite acoustique stricte à l'intérieur du **coupleur**, ou il convient de connaître leur contribution à l'élasticité du **coupleur**. Il convient également de concevoir les **hydrophones** de façon à ce que le volume intérieur du **coupleur** soit connu lorsqu'ils sont montés dans le **coupleur**. Peu d'**hydrophones** satisfont à ces restrictions. Afin d'étalonner un ensemble plus général d'**hydrophones**, le processus peut être étendu par l'utilisation des techniques décrites à l'Annexe A.

9.4 Mesurage

9.4.1 Généralités

Le mesurage doit être effectué conformément à 6.3, 6.4, et comme suit.

9.4.2 Mise en évidence des effets d'interférence

Les mesurages ne doivent pas être soumis à des interférences dues à la diaphonie électrique.

9.4.3 Vérification de la réciprocité

Étant donné que la méthode dépend de l'hypothèse selon laquelle au moins un transducteur est réciproque, cette hypothèse doit être vérifiée. La réciprocité d'un couple de **transducteurs réciproques** doit être vérifiée en comparant les modules 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) [12].

NOTE 1 Pour les transducteurs qui fonctionnent bien dans leur plage de fonctionnement principale, il est possible d'obtenir un accord entre les impédances de transfert de quelques pourcents.

NOTE 2 Un désaccord de plus de $\pm 5\%$ 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).

Des divergences importantes entre $|Z_{PT}|$ et $|Z_{TP}|$ peuvent se produire si un ou les deux transducteurs sont trop sollicités, entraînant un comportement non linéaire. Dans ce cas, la réduction de l'amplitude du **signal** d'entraînement vers les transducteurs améliore l'accord. Cependant, si une réduction de ce type entraîne un rapport **signal**/bruit inacceptablement faible, l'utilisation de transducteurs alternatifs doit être envisagée.

Pour l'**incertitude** la plus faible dans les étalonnages par réciprocité, les **transducteurs réciproques** doivent être utilisés dans leur bande normale de fonctionnement (généralement jusqu'à la fréquence de la première résonance pour un transducteur piézoélectrique).

NOTE 3 L'utilisation d'un transducteur à des fréquences hors de cette bande (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.

NOTE 4 L'étalonnage d'un **hydrophone** sur une large bande de fréquences peut exiger l'utilisation de plusieurs **transducteurs réciproques** différents, afin de couvrir la bande complète avec une **incertitude** suffisamment faible.

NOTE 5 Si les transducteurs dans la vérification de la réciprocité sont de construction identique, ils peuvent être non linéaires de la même façon et sembler toujours réciproques. Par conséquent, la vérification de la réciprocité est effectuée dans les meilleures conditions en utilisant des transducteurs de construction différente, avant que l'un d'eux puisse être réputé réciproque.

9.4.4 Vérification de la linéarité

En cas de doute concernant la linéarité des transducteurs, la linéarité de chaque couple de transducteurs doit être vérifiée par comparaison des modules de l'**impédance électrique de transfert** pour différents niveaux du courant du **projecteur**, compris dans la plage dynamique de fonctionnement du système, à la même fréquence. Depuis le niveau situé à 20 dB au-dessus du bruit de fond jusqu'au niveau maximal utilisé, le module de l'impédance de transfert ne doit pas dépasser $\pm 5\%$.

Pendant les opérations d'étalonnage proprement dit, il convient de veiller à maintenir les niveaux des signaux dans l'intervalle de linéarité. Sachant que cet intervalle peut varier pour chaque couple de transducteurs, une observation minutieuse des niveaux des **signaux** est nécessaire.

9.5 Incertitude

Si les conditions de réciprocité, de linéarité et de limite de haute fréquence sont satisfaites, comme cela est spécifié en 9.3.1.1, 9.4.3, et 9.4.4, alors l'**incertitude** élargie globale (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage peut être inférieure à 0,5 dB, en effectuant l'essai minutieusement.

NOTE 1 Les éléments qui contribuent le plus à l'**incertitude** globale sont l'**incertitude** de l'élasticité du **coupleur** et la non-uniformité de champ à l'intérieur du **coupleur**.

NOTE 2 En incluant tous les éléments qui contribuent à l'élasticité du **coupleur**, en réduisant la fréquence maximale de fonctionnement même aux fréquences plus basses et en calculant les effets de la non-uniformité de champ acoustique, l'**incertitude** élargie globale (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage peut être réduite à moins de 0,2 dB (voir Annexe A).

NOTE 3 Si un **hydrophone** possède un préamplificateur, il est habituel de placer uniquement l'élément actif de l'**hydrophone** dans le **coupleur**, afin de conserver un **coupleur** de petites dimensions. Si le revêtement du préamplificateur de l'**hydrophone** diffuse des sons, la sensibilité de circuit ouvert en champ libre de l'**hydrophone**

diffère alors de sa **sensibilité en pression**. Ce phénomène constitue l'une des raisons pour lesquelles le **facteur de diffraction** peut différer de l'unité.

10 Étalonnage par pistonphone

10.1 Généralités

Cette méthode d'étalonnage des **hydrophones** avec ou sans transducteur de référence s'applique aux fréquences comprises entre quelques hertz et plusieurs centaines de hertz par **pistonphone** dans une chambre fermée. Cette chambre peut être remplie d'air ou partiellement remplie d'eau [12], [25] à [27]. Pour la mise en œuvre décrite ici, cette méthode d'étalonnage fournit une valeur du module de sensibilité de l'**hydrophone** uniquement.

10.2 Principe

10.2.1 Détermination de la pression acoustique

Dans un **pistonphone**, la pression acoustique est produite dans une petite chambre fermée remplie d'air par un piston vibrant de façon sinusoïdale, entraîné par un **signal** à ondes entretenues. Le piston peut être entraîné par un moteur électrique ou un transducteur à bobine mobile. La pression acoustique p dans la chambre pour une fréquence circulaire spécifique ω doit être calculée à partir de l'impédance acoustique connue, $|Z_{AI}|$, et de la vitesse du volume, $|u|$:

$$p(\omega) = |u| |Z_{AI}| \quad (28)$$

NOTE La vitesse du volume variant de façon sinusoïdale peut être formulée en matière de dérivée de la variation du volume ΔV .

Calculer la pression acoustique p dans la chambre à l'aide de l'Équation (29):

$$p(\omega) = |j\omega\Delta V| \frac{1}{|j\omega C_M|} = \frac{\Delta V}{C_M} \quad (29)$$

où

C_M est l'élasticité du milieu;

ΔV est la variation du volume.

La pression acoustique générée est manifestement indépendante de la fréquence et doit par conséquent être calculée à partir de la connaissance de ΔV et de C_M . La variation du volume peut être déterminée à partir de la surface du piston et de son déplacement, ce dernier étant mesuré au moyen d'un accéléromètre (avec intégration de la sortie par rapport au temps), ou d'un interféromètre optique [26], [27].

10.2.2 Détermination de l'élasticité du milieu

Les résonances du milieu et des limites doivent être à des fréquences supérieures à la bande de fréquences concernée et l'impédance acoustique doit être purement élastique.

NOTE 1 L'élasticité peut être considérée comme l'élasticité du milieu uniquement, étant donné que l'élasticité des limites de la chambre et de l'**hydrophone** est généralement bien inférieure au milieu.

L'élasticité doit être calculée à partir des lois des gaz:

$$C_M = \frac{V_t}{\gamma p_s} \quad (30)$$

où

V_t est le volume total;

p_s est la pression statique;

γ est le **rapport des chaleurs massiques** pour le gaz.

NOTE 2 Si cela est nécessaire à des fréquences très basses, des corrections peuvent être apportées à C_M , par exemple, pour prendre en compte la conduction de la chaleur des parois de la chambre.

10.2.3 Calcul de la sensibilité en pression

Pour un **pistonphone** utilisé pour un étalonnage absolu, le module de la **sensibilité en pression** $|M_p|$ de l'**hydrophone** doit être calculé à partir de la tension de ce dernier U_H :

$$|M_p| = \frac{U_H V_t}{\Delta V \gamma p_s} \quad (31)$$

Dans le calcul, les valeurs métriques des signaux sinusoïdaux pour la tension de l'**hydrophone** et la vitesse du volume doivent être identiques (par exemple, valeurs d'amplitude de crête, ou valeurs efficaces).

10.3 Limites

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences supérieures à la fréquence limite supérieure provoquée par une pression acoustique non uniforme dans la chambre. Pour l'hypothèse du maintien d'une pression uniforme, la dimension la plus grande de la chambre ne doit pas dépasser un seizième de la longueur d'onde (ce qui est équivalent à environ 70 mm pour une chambre remplie d'air qui fonctionne jusqu'à 300 Hz).

NOTE 1 La fréquence augmentant, la pression devient non uniforme à mesure que les modes d'ondes commencent à devenir évidents dans la chambre. Si la chambre est à géométrie simple, des corrections peuvent être apportées à ces modes d'ondes, mais l'**incertitude** relative aux corrections augmente avec la fréquence. Ce phénomène détermine en général la limite de la fréquence supérieure de fonctionnement qui dépend de la taille de la chambre. Pour les dimensions d'une chambre type, cette limite est de l'ordre de 300 Hz à 500 Hz.

NOTE 2 Une pression non uniforme entraîne des erreurs dans l'étalonnage absolu, étant donné que la pression acoustique au niveau de l'**hydrophone** n'est alors pas celle calculée à partir de la vitesse du volume du piston et de l'élasticité de la chambre. Dans le cas d'un étalonnage par comparaison, l'**hydrophone** et le microphone/**hydrophone** de référence ne subissent pas la même pression acoustique.

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences inférieures à la fréquence limite inférieure provoquée par la conduction thermique entre l'air et les parois de la chambre et les fuites d'air autour du piston. Ces effets sont généralement négligeables pour les fréquences supérieures à 5 Hz, mais des corrections peuvent être apportées pour pouvoir utiliser la méthode à des fréquences inférieures à 1 Hz [26], [27].

NOTE 3 L'écart par rapport aux conditions purement adiabatiques peut se produire à des fréquences basses en raison de la conduction thermique entre l'air et les parois de la chambre. L'effet est généralement faible, mais augmente à mesure que la fréquence diminue. À des fréquences supérieures à 5 Hz, l'effet est négligeable.

NOTE 4 Les fuites d'air se produisant autour du piston dépendent du jeu radial entre le piston et l'alésage. Si ce jeu est de l'ordre de quelques centièmes de millimètres, tout effet est négligeable pour les fréquences supérieures à 5 Hz.

10.4 Étalonnage relatif

10.4.1 Comparaison avec un transducteur de référence

Un étalonnage relatif doit être obtenu en insérant un transducteur de référence étalonné dans la chambre avec le dispositif en essai. Le **pistonphone** doit être utilisé ici afin de fournir une pression acoustique stable pour permettre l'étalonnage par comparaison.

NOTE 1 Cette situation présente l'avantage de ne pas rendre nécessaire le calcul de la variation du volume et de l'élasticité.

Le dispositif de référence utilisé doit être un microphone étalonné. Le module de la **sensibilité en pression** $|\underline{M}_p|$ de l'**hydrophone** doit être calculé à partir de l'équation:

$$|\underline{M}_p| = \frac{U_H}{U_M} |\underline{M}_M| \quad (32)$$

où

U_M est la tension de réception du microphone;

M_M est la sensibilité du microphone.

L'**hydrophone** et le microphone doivent être simultanément insérés dans le **coupleur** et exposés à la même pression acoustique plutôt que d'utiliser une procédure de substitution.

NOTE 2 Cette opération assure que le volume du **coupleur** ne varie pas entre les mesurages.

Les dimensions de la chambre doivent être petites par rapport à la longueur d'onde acoustique. Dans de telles conditions, et si la chambre est délimitée de façon rigide, la pression acoustique peut être considérée comme constante dans la chambre à des fréquences basses.

10.4.2 Comparaison par pistonphone air-eau

Le piston doit être utilisé pour entraîner une petite cavité d'air au-dessus de l'eau et la pression acoustique doit être la même à la fois dans l'air et dans l'eau. Un microphone doit être utilisé pour contrôler la pression dans la cavité d'air. Un étalonnage par comparaison entre deux **hydrophones** doit être effectué, ou bien un étalonnage absolu doit être tenté [12], [28].

NOTE 1 La Figure 5 présente un schéma d'un **pistonphone** air-eau utilisé pour un étalonnage par comparaison entre deux **hydrophones**.

NOTE 2 Un **pistonphone** air-eau présente l'avantage suivant: en raison de la vitesse du son plus élevée (et par conséquent une longueur d'onde plus grande) dans le milieu liquide, la fréquence à laquelle la pression n'est plus uniforme est augmentée. Une chambre dont la conception reste simple et symétrique permet d'obtenir une pression acoustique uniforme dans la bande de fréquences la plus élevée.

NOTE 3 Un **pistonphone** entièrement rempli d'eau a également été utilisé [13]. Cependant, contrairement au cas du milieu atmosphérique, l'élasticité des limites n'est ici plus faible par rapport à celle de l'eau (la gaine, le câble et les parois délimitantes de l'**hydrophone** peuvent tous contribuer à ce phénomène), exigeant une mesure de l'élasticité au cours de chaque étalonnage.

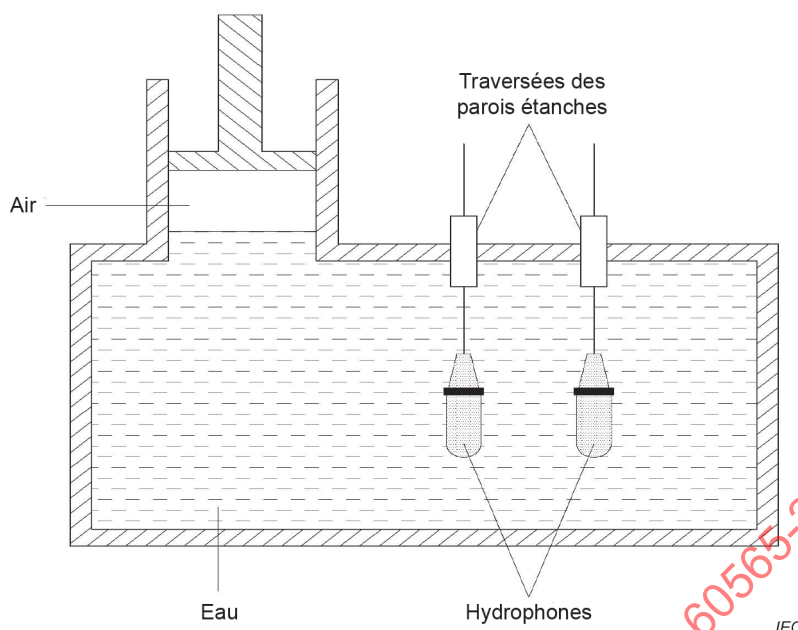


Figure 5 – Étalonnage par comparaison au moyen d'un pistonphone avec un hydrophone étalonné

10.5 Incertitude

L'**incertitude** globale doit être évaluée et établie avec la sensibilité de l'**hydrophone**. Si les conditions spécifiées en 10.2 et 10.3 sont satisfaites, l'**incertitude** élargie globale (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage doit être inférieure à 0,5 dB. Pour l'étalonnage par comparaison au moyen du **pistonphone**, l'**incertitude** est en général supérieure. Avec une bonne pratique, elle peut être inférieure à 1,0 dB (niveaux de confiance à 95 %).

11 Étalonnage par colonne vibrante

11.1 Généralités

Cette méthode d'étalonnage des **hydrophones** avec ou sans **hydrophone** de référence s'applique pour la bande de fréquences de 10 Hz à 2 kHz par **colonne vibrante**. L'étalonnage s'effectue dans une chambre ouverte, avec une longueur d'onde plus grande que la longueur de la colonne, en permettant l'étalonnage simple d'un **hydrophone** [12], [29]. Pour la mise en œuvre décrite ici, cette méthode d'étalonnage fournit une valeur du module de sensibilité de l'**hydrophone** uniquement.

11.2 Principe

11.2.1 Généralités

Immerger un **hydrophone** dans une colonne de liquide, qui est soumise extérieurement à une excitation sinusoïdale, l'**hydrophone** étant maintenu immobile et suspendu verticalement à proximité de l'axe central de la colonne.

La colonne de liquide doit être contenue dans un récipient cylindrique à parois rigides. À l'intérieur de ce récipient, ouvert sur la partie supérieure, l'excitation de la colonne de liquide doit s'effectuer soit par un transducteur électrodynamique fixé sur la partie inférieure, soit par un générateur de vibrations, excitant l'ensemble du récipient, conformément à la Figure 6.

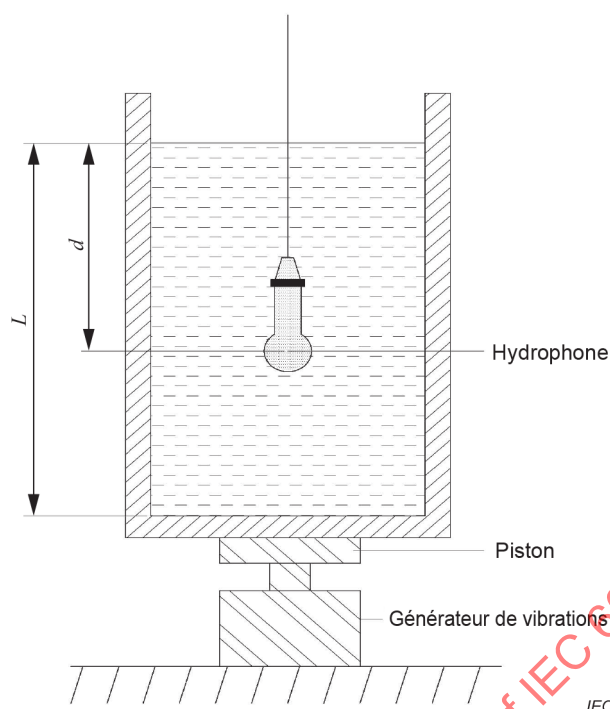


Figure 6 – Schéma d'étalonnage par colonne vibrante

La sensibilité de l'**hydrophone** doit être obtenue à partir de la pression calculée à la profondeur d'immersion de l'**hydrophone**, et de la mesure de la tension en circuit ouvert.

NOTE Cette méthode est une méthode d'étalonnage absolu, bien qu'elle se prête aussi à l'étalonnage par comparaison séparée. Voir 10.2.

La limite supérieure de la bande de fréquences utile dépend de la dimension du récipient, qui ne doit pas dépasser un quart de la longueur d'onde du son dans le liquide. Voir 11.3.1.

11.2.2 Expression pour la pression

En considérant que tous les points du liquide se déplacent de façon égale par rapport à leur position d'équilibre, l'amplitude p_0 de la pression oscillatoire en un point du liquide situé à une profondeur d sous la surface doit être calculée par:

$$p_0 = \rho_f x_0 |g - d\omega^2| \quad (33)$$

où

ρ_f est la densité du liquide;

x_0 est l'amplitude vibratoire à la base du récipient.

NOTE L'Équation (33) ne tient pas compte des fluctuations de pression dues à l'écoulement du liquide autour de l'**hydrophone**. Ces fluctuations sont faibles par rapport à la pression du **signal**, lorsque l'**hydrophone** est petit par rapport à la profondeur d'immersion et lorsque l'amplitude vibratoire est petite par rapport à la dimension de l'**hydrophone**. Voir [30].

À des fréquences très basses, où $d\omega^2$ est faible par rapport à g , l'Équation (33) est réduite à:

$$p_0 = \rho_f g x_0 \quad (34)$$