

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

AMENDMENT 2 AMENDEMENT 2

Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz

Ultrasons – Hydrophones – Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques jusqu'à 40 MHz



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 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
Fax: +41 22 919 03 00
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions 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

65 000 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.

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: csc@iec.ch.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Specifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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 aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions 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

65 000 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.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

AMENDMENT 2
AMENDEMENT 2

**Ultrasonics – Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz**

**Ultrasons – Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques jusqu'à 40 MHz**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8322-3904-9

**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.**

FOREWORD

This amendment has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics.

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

CDV	Report on voting
87/612/CDV	87/639/RVC

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

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

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

2 Normative references

Add the following new reference:

IEC 61689, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

3 Terms, definitions and symbols

3.26

derived instantaneous intensity

(added by Amendment 1)

Delete the following text below the term:

"approximation of the **instantaneous intensity**"

Replace the existing four lines before Equation (1) by the following:

quotient of squared instantaneous acoustic pressure and characteristic acoustic impedance of the medium at a particular instant in time at a particular point in an acoustic field

4 List of symbols

Replace:

ρc specific acoustic impedance

by

ρc characteristic acoustic impedance of the measurement liquid (water)

Add the following new symbols:

d_1 distance between the auxiliary transducer and the reflector measured along the axis of symmetry

d_h distance between the auxiliary transducer and the active element of the hydrophone measured along the axis of symmetry

d_m distance between the auxiliary transducer and the last minimum of the acoustic pressure amplitude along the axis of symmetry of the auxiliary transducer

R_{RT} amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface

Z_{RT} characteristic acoustic impedance of the reflector

J_p reciprocity coefficient for plane waves

S_t^* apparent transmitting current response of an auxiliary transducer

M_t^* apparent receiving voltage response of an auxiliary transducer

p_a acoustic pressure generated by a transducer at its surface

p_i acoustic pressure incident on a transducer surface

p_h acoustic pressure incident on the hydrophone surface

I_t transmitting current driven to a transducer

U_t voltage generated by a transducer in the receiving mode

G_{th} correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the waveform generation by the transducer and the reception by the hydrophone

G_{tt} correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation and the reception by the transducer

U_{load} voltage measured with the transducer coupled to the system

I_{sc} current measured over a short circuit jumper replacing the transducer

9 Free field reciprocity calibration

9.1 General

Replace the existing text by the following:

This clause specifies the primary reference measurement procedure (see JCGM 200:2012, 2.8 [79]) calibration of **hydrophones** under **free field** conditions using the principle of reciprocity.

Add the following new note:

NOTE The free field condition can be achieved in a confined water space by following any of a variety of measurement procedures, such as with the use of tone-burst (time-gated sine wave – see 10.5.3), time-delay spectrometry [63, 68], frequency modulated chirp [80, 81] or other techniques [82].

9.4 Two-transducer reciprocity calibration method

9.4.1 Apparatus

Replace the existing subclause title and text by the following:

9.4.1 Auxiliary transducers

Circularly plane piston auxiliary transducers should be used to generate the ultrasonic field in the frequency range of interest, limited to the maximum range between 1 MHz and 15 MHz. The effective radiation area (A_{ER}) shall be determined, according to IEC 61689, for each transducer and at all frequencies the transducer is intended to be used. If a frequency modulated chirp is to be used as excitation signal, the A_{ER} shall be determined at least in the minimum, maximum and one intermediate frequency in the range of interest.

The position of the last minimum of acoustic pressure amplitude along the axis of symmetry, d_m , shall be determined with an uncertainty not larger than 1 mm. It shall be done as an on-axis line scan, according to IEC 61689, at the same frequencies the A_{ER} was determined. The near field distance produced by the auxiliary transducer is defined as $N_1 = a_t^2/\lambda$, where λ is the ultrasonic wavelength in water at the frequency of operation and $a_t = \sqrt{2\lambda d_m + \lambda^2}$ is the effective radius of the ultrasonic transducer.

NOTE Focusing auxiliary transducers can be used, but several corrections need to be applied, and this document is only intended for plane-piston transducers. A detailed implementation of a reciprocity-based calibration method using focusing transducers can be found in [84].

The effective radiation area (A_{ER}) is used in the equations of Annex K to properly assess the diffraction correction and the reciprocity coefficient for plane waves, whilst the last minimum of pressure amplitude along the axis of symmetry (d_m) is used to indirectly define the near field distance (N_1), being $N_1 = (2\lambda d_m + \lambda^2)/\lambda$. Although both quantities A_{ER} and d_m are directly linked for ideal transducers, both shall be determined experimentally according to IEC 61689.

9.4.2 Procedure

Replace the existing subclause title and text by the following:

9.4.2 Reflector

The reflector should comprise a flat surface whose smallest linear dimension shall be at least four times the effective radius of the ultrasonic transducer a_t . The reflector shall also be flat to $\pm 10 \mu\text{m}$, with a surface finish good to $\pm 5 \mu\text{m}$ (surface roughness: $R_v < 5 \mu\text{m}$; $R_p < 5 \mu\text{m}$; $R_a < 1 \mu\text{m}$). The thickness of the reflector shall be such that the first reflection from the rear surface will not interfere with that directly from the front surface for any of the excitation signals to be used. Special attention shall be given for long burst or low-rate frequency modulated chirps, mainly at the lowest frequencies of interest.

The amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface R_{RT} shall be experimentally determined, for instance by the relation $R_{RT} = (Z_{RT} - \rho c)/(Z_{RT} + \rho c)$, where ρc is the characteristic acoustic impedance of the water and Z_{RT} is the characteristic acoustic impedance of the reflector.

NOTE R_v is the maximum valley depth, R_p is the maximum peak height and R_a is the arithmetic average describing the reflector profile roughness amplitude parameters.

Add the following new subclauses:

9.4.3 Measurement field

As both the auxiliary transducer and the **hydrophone** have finite apertures, a diffraction pattern is present in the ultrasonic field. To minimize uncertainties due to the analytical or

numerical corrections to be applied to the measurement quantities, the nearest measurement shall be performed at least at $0,9 \times N_1$, and the furthest distance shall not be larger than $2,2 \times N_1$. Water-air surface and tank walls shall be far enough from the ultrasonic path such that any reflected waveform will not interfere with the direct waveform at the measurement spot.

If any structure is too close to the direct ultrasonic waveform path, it shall be covered with absorbing lining to minimize the interference with the measurement signal, and concern about that interference shall be included in the uncertainty budget.

9.4.4 Reciprocity approach

Reciprocity can be established as a primary **hydrophone** calibration method provided some practical and theoretical details are adopted. Annex K depicts the fundamentals of the reciprocity approach.

9.4.5 Measurement procedure

Several distinct setups (see Annex K [83, 84, 85]) could be used regarding the positioning of the three main elements of the two-transducer reciprocity calibration method: auxiliary transducer, reflector and **hydrophone**.

Regardless of the configuration adopted, the self-calibration of the auxiliary transducer is the first step, and it is done to quantify the acoustic pressure generated by the transducer in a defined spot in the ultrasonic field.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AMD2:2017

Annex K (informative)

Two-transducer reciprocity calibration method

Replace the existing Annex K, added by Amendment 1, by the following:

K.1 General

The two-transducer reciprocity method involves the assessment of the acoustic pressure in a defined spot in the ultrasonic field. To accomplish that, the first step is to assess the ultrasonic field generated by an auxiliary transducer. The second step is to place the active element of the **hydrophone** to be calibrated in a defined spot for which the acoustic pressure can be defined as precisely as possible.

K.2 Fundamentals of reciprocity

A reversible transducer has an apparent transmitting current response $S_t^*(\omega)$ and apparent receiving voltage response $M_t^*(\omega)$ defined as

$$S_t^* = \frac{p_0(\omega)}{I_t(\omega)} \quad \text{and} \quad M_t^* = \frac{U_t(\omega)}{p_i(\omega)} \quad (\text{K.1})$$

where p_0 is the acoustic pressure generated by the auxiliary transducer at its surface, I_t is the transmitting current of the transducer, p_i is the acoustic pressure incident on the transducer surface and U_t is the voltage generated by the transducer in the receiving mode.

NOTE The term 'acoustic pressure' is used in Annex K, although it is recognized that in any practical situation this quantity will vary spatially. Similarly, the electrical output of transducer devices used in reception mode will be dependent on the acoustic pressure spatially-averaged on their active surface.

If the transducer is reciprocal, the reciprocity coefficient for plane waves J_p relates $S_t^*(\omega)$ and $M_t^*(\omega)$ as follows:

$$J_p = \frac{M_t^*(\omega)}{S_t^*(\omega)} \quad (\text{K.2})$$

By definition, $J_p = \frac{2A_{ER}}{\rho c} I_p = \frac{2A_{RR}}{\rho c}$.

If the wave generated by a reciprocal transducer propagates in water and reflects off with a normal incidence at a reflector distant d_1 from the transducer surface placed on its axis of symmetry, it produces an incident wave whose acoustic pressure can be measured by the reciprocal transducer. Relating the definition by Equation (K.3)

$$p_i(\omega) = p_0(\omega) R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt} \quad (\text{K.3})$$

where α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves in water and G_{tt} is the correction due to the fact that the returning waveform is generated and measured by a finite transducer, i.e. it accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation and reception by the transducer. Combining Equations (K.1), (K.2) and (K.3), the

acoustic pressure generated by a reciprocal transducer at its surface is related to electrical and geometrical quantities as follows:

$$p_0(\omega) = \sqrt{U_t(\omega) I_t(\omega) \frac{\rho c}{2A_{ER} R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt}}} . \quad (K.4)$$

A normal incidence reflection on the reflector is necessary for the self-calibration. This is ensured by maximizing the waveform reflection from the reflector as measured by the transducer. The driven electrical current I_t is measured with the auxiliary transducer in the output mode. The input voltage U_t is measured when the auxiliary transducer is in the input mode. It should be an open-circuit voltage, and electrical corrections should be applied to the measured current and voltage.

In sequence, the **hydrophone** active element is placed in a determined spot in the ultrasonic field, and the acoustic pressure is maximized in order to assure the alignment of the **hydrophone** active element symmetry axis and the transducer symmetry axis. The acoustic pressure at this point is calculated using the following expression:

$$p_h(\omega) = p_0(\omega) e^{-\alpha d_h} G_{th} \quad (K.5)$$

where p_h is the measured acoustic pressure incident on the **hydrophone's** active element if the **hydrophone** were removed, d_h is the distance from the transducer surface to the active hydrophone element measured on the symmetry axis, and G_{th} is the correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation transducer and the reception by the **hydrophone**.

The open-circuit voltage from the **hydrophone** U_h should be measured with p_h incident on its active element. The end of cable sensitivity is therefore given as

$$M(\omega) = \frac{U_h(\omega)}{p_h(\omega)} \quad (K.6)$$

K.3 Electrical quantities

The transmitting current, I_t , shall be measured as precisely as possible, which can be performed in many different ways. Measuring the voltage drop across a calibrated impedance or using a current probe are typical electrical setups.

The output voltage from the transducer in the receiving mode, U_t , shall be measured unloaded by the transducer, i.e. as an open circuit voltage. One way to perform that is to measure the current over a short circuit replacing the transducer. The open circuit voltage is

$$U_t(\omega) = U_{load}(\omega) \frac{I_{sc}(\omega)}{I_t(\omega)} \quad (K.7)$$

where U_{load} is the voltage measured with the transducer coupled to the system and I_{sc} is the current measured over a short circuit jumper replacing the transducer.

In the case of a constant load assumed throughout the calibration process, corrections described in Annex C could be applied directly to the final assessed sensitivity.

K.4 Diffraction correction and loss due to nonlinear sound propagation

Due to the finite size of auxiliary transducers and **hydrophones**, a diffraction pattern develops in the ultrasonic field. In the two-transducer reciprocity method, two diffraction corrections are applied: G_{th} , correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the waveform generation by the transducer and the reception by the **hydrophone**, and G_{tt} , correction due the generation and the reception by the transducer. Many references can be used to theoretically describe the diffraction loss in ultrasonic fields [83, 86, 87], and a numerical implementation of diffraction corrections can be applied [88, 89, 90, 91].

K.5 Ultrasonic field

For the two-transducer reciprocity calibration, the ultrasonic field is shaped by the influence of many aspects, mainly:

- diffraction pattern for both the auxiliary transducer and hydrophone (see K.3);
- signal type (see Annex G and [8, 80]);
- reflector reflection coefficient (see 9.4.2);
- water path attenuation (see [92]);
- speed of sound (see [36]).

The amplitude attenuation coefficient for plane ultrasonic waves, α , in the megahertz frequency range is proportional to f^2 , and should be taken from a polynomial fit as a function of temperature T in the temperature range from 0 °C to 60 °C [92]:

$$\alpha / f^2 = \left(\begin{array}{l} 5,685 \cdot 10^1 - 3,025 \cdot 10^0 \{T\} \\ + 1,174 \cdot 10^{-1} \{T\}^2 - 2,954 \cdot 10^{-3} \times \{T\}^3 \\ + 3,970 \cdot 10^{-5} \{T\}^4 - 2,111 \cdot 10^{-7} \{T\}^5 \end{array} \right) \times 10^{-15} \text{Hz}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} \quad (\text{K.8})$$

NOTE 1 $\{T\}$ denotes the numerical value of the temperature in °C.

NOTE 2 If the amplitude attenuation coefficient in m^{-1} is going to be given in dB m^{-1} , its numerical value should be multiplied by $20 \cdot \log_{10}(e) = 8,69$.

The speed of sound is presented in tables in [36], and polynomial fits are available for different accuracies, temperature ranges, and barometric pressures. The contribution for the uncertainty budget should be taken into account regarding the formula used to assess the speed of sound.

- a) Temperature range: 0 °C to 100 °C at atmospheric pressure; accuracy better than 0,02 ms^{-1} (see [93])

$$c = \left(\begin{array}{l} 1402,39 + 5,03836 \{T\} - 0,0581173 \{T\}^2 \\ + 3,34638 \cdot 10^{-4} \{T\}^3 - 1,48260 \cdot 10^{-6} \{T\}^4 \\ + 3,16585 \cdot 10^{-9} \{T\}^5 \end{array} \right) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.9})$$

- b) Temperature range: 10 °C to 40 °C at atmospheric pressure; accuracy better than 0,18 ms^{-1} (see [93])

$$c = (1405,03 + 4,624 \{T\} - 0,0383 \{T\}^2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.10})$$

- c) Temperature range: 15 °C to 35 °C at atmospheric pressure; accuracy better than 0,20 ms⁻¹ (see [94])

$$c = (1404,3 + 4,7 \{T\} - 0,04 \{T\}^2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.11})$$

For the atmospheric pressure dependence of the speed of sound, see [95].

K.6 Experimental setup

K.6.1 General

Different experimental arrangements have been proposed to perform the two-transducer reciprocity calibration. Regardless of the electrical setup, the main concern in the experimental preparation comprises the positioning of the auxiliary transducer, reflector, and **hydrophone**. Three experimental setups are shown, each of them presenting advantages and drawbacks.

K.6.2 Twisting reflector

Figure K.1 depicts an arrangement in which the reflector is twisted between the two steps of the calibration procedure. Care should be taken to avoid a large angle of rotation of the reflector. A maximum of 10° would be acceptable, but the uncertainty of the **hydrophone** voltage measurement due to non-normal reflection should be considered. Moreover, for large membrane **hydrophones**, it could be a negative issue to set the rotation angle small. Another negative aspect of this arrangement is that it may not be simple to rotate large and heavy stainless steel reflectors with appropriate accuracy.

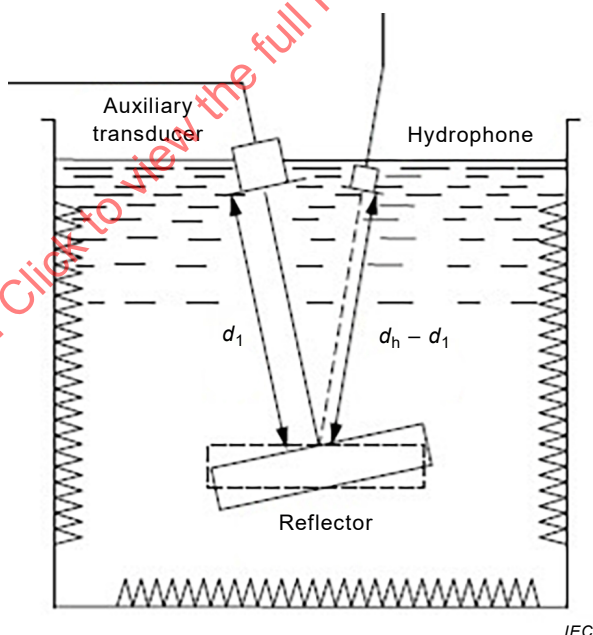


Figure K.1 – Experimental setup with a twisting reflector [83]

K.6.3 Translational reflector

Figure K.2 discloses an arrangement in which the reflector is inserted in the path between the auxiliary transducer and the **hydrophone**.

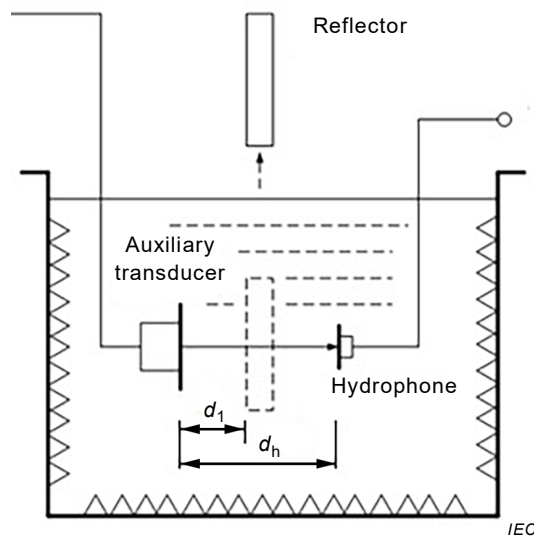


Figure K.2 – Experimental setup with a translational reflector [84]

K.6.4 Translational auxiliary transducer

In Figure K.3, the **hydrophone** and the reflector remain still during the measurement procedure, and the moving element is the transducer.

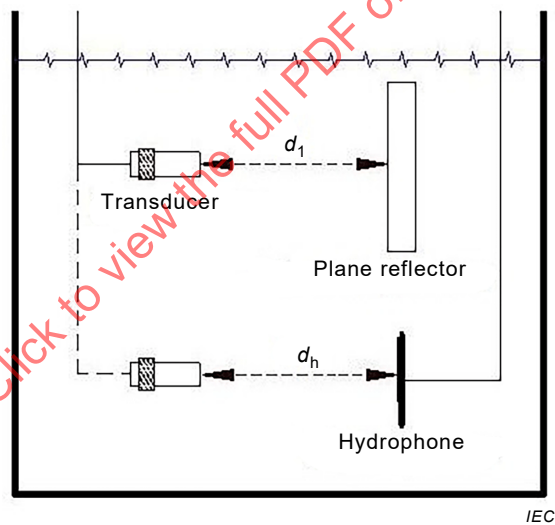


Figure K.3 – Experimental setup with a translational auxiliary transducer [85]

Bibliography

Add the following references:

- [79] BIPM JCGM 200:2012, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*.
- [80] ISAEV, A.E. and Matveev A.N. Calibration of Hydrophones in a Field with Continuous Radiation in a Reverberating Pool. *Acoustical Physics*, 2009, vol. 55, no. 6, p. 762-770.
- [81] COSTA-FELIX, R.P.B. and MACHADO, J.C. Output bandwidth enhancement of a pulsed ultrasound system using a flat envelope and compensated frequency-modulated input signal: Theory and experimental applications. *Measurement*, 2015, vol. 69, p. 146-154.
- [82] ISAEV, A.E. A Quality Criterion for Obtaining Free-Field Conditions when Calibrating a Hydroacoustic Receiver in a Water Tank with Reflecting Sides. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, p. 549-556.
- [83] BRENDDEL, K., LUDWIG, G. Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers. *Acustica*, 1976, vol. 36, p. 203.
- [84] SHOU W, DUAN S, HE P, XIA R, QIAN D. Calibration of a Focusing Transducer and Miniature Hydrophone As Well As Acoustic Power Measurement Based on Free-Field Reciprocity in a Spherically Focused Wave Field. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 2006, vol. 53 no. 3, p. 564-570.
- [85] OLIVEIRA, E.G., COSTA-FELIX, R.P.B. and MACHADO, J.C. Primary reciprocity-based method for calibration of hydrophone magnitude and phase sensitivity: complete tests at frequencies from 1 to 7 MHz. *Ultrasonics*, 2015, vol. 58, p. 87-95.
- [86] BRENDDEL, K., LUDWIG, G. Measurement of Ultrasonic Diffraction Loss for Circular Transducers. *Acustica*, 1975, vol. 32, p.110.
- [87] BEISSNER, K. Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field. *Acustica*, 1980, vol. 46, p.162.
- [88] FAY, B. Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern. *Acustica*, 1976, vol. 36, p. 209.
- [89] KHIMUNIN, A.S. Numerical Calculation of the Diffraction Corrections for the Precise Measurement of Ultrasound Absorption. *Acustica*, 1972, vol. 27, p. 173.
- [90] BEISSNER, K. Exact integral expression for the diffraction loss of a circular piston source. *Acustica*, 1981, vol. 49, p. 212.
- [91] YOSHIOKA, SATO, KIKUCHI and MATSUDA. Influence of ultrasonic nonlinear propagation on hydrophone calibration using two-transducer reciprocity method. *Jpn. J. App. Phys.*, 2006, vol. 45, No.5B, p.4547-4549.
- [92] PINKERTON, J.M.M. A Pulse Method for the Measurement of Ultrasonic Absorption in Liquids Results for Water. *Nature*, 1947, vol. 160, p. 128.
- [93] BILANIUK, N, WONG, G.S.K. Erratum: Speed of sound in pure water as a function of temperature, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, vol. 99, no. 5, p. 3257.

- [94] LUBBERS, J, GRAAFF, R. A simple and accurate formula for the sound velocity in water, *Ultrasound Med. Biol.*, 1998, vol 24, no. 7, p. 1065-1068.
- [95] BELOGOL'SKII, V.A., SEKOYAN, S.S., SAMORUKOVA, L.M. STEFANOV, S.R., Levtsov, V.I. Pressure dependence of the sound velocity in distilled water, *Measurement Techniques*, 1999, vol. 42, no. 4, p. 406-413.
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AMD2:2017

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AMD2:2017

AVANT-PROPOS

Le présent amendement a été établi par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons.

Le texte de cet amendement est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
87/612/CDV	87/639/RVC

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

Le comité a décidé que le contenu de cet amendement et de la publication de base 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. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

2 Références normatives

Ajouter la nouvelle référence suivante:

IEC 61689, *Ultrasons – Systèmes de physiothérapie – Spécifications des champs et méthodes de mesure dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 5 MHz*

3 Termes, définitions et symboles

3.26

intensité instantanée dérivée

(Ajouté par l'Amendement 1)

Supprimer la ligne de texte en dessous du terme:

"approximation de l'**intensité instantanée**"

Remplacer les quatre lignes existantes avant l'Equation (1) par ce qui suit:

quotient de la pression acoustique instantanée au carré et de l'impédance acoustique caractéristique du milieu à un instant donné en un point donné d'un champ acoustique

4 Liste des symboles

Remplacer:

ρc impédance acoustique spécifique

par

ρc impédance acoustique caractéristique du liquide de mesure (eau)

Ajouter les nouveaux symboles suivants:

d_1 distance entre le transducteur auxiliaire et le réflecteur, mesurée le long de l'axe de symétrie

d_h distance entre le transducteur auxiliaire et l'élément actif de l'hydrophone, mesurée le long de l'axe de symétrie

d_m distance entre le transducteur auxiliaire et la dernière valeur minimale de l'amplitude de la pression acoustique le long de l'axe de symétrie du transducteur auxiliaire

R_{RT} coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau

Z_{RT} impédance acoustique caractéristique du réflecteur

J_p coefficient de réciprocité pour les ondes planes

S_t^* réponse apparente de transmission au courant d'un transducteur auxiliaire

M_t^* réponse apparente de réception en tension d'un transducteur auxiliaire

p_a pression acoustique générée par un transducteur à sa surface

p_i pression acoustique incidente sur la surface du transducteur

p_h pression acoustique incidente sur la surface de l'hydrophone

I_t émission en courant commandée à un transducteur

U_t tension générée par un transducteur en mode réception

G_{th} correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération de formes d'onde par le transducteur et la réception par l'hydrophone

G_{tt} correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération et à la réception par le transducteur

U_{load} tension mesurée en couplant le transducteur au système

I_{sc} courant mesuré sur une liaison en court-circuit remplaçant le transducteur

9 Etalonnage réciproque en champ libre

9.1 Généralités

Remplacer le texte existant par le texte suivant:

Cet article spécifie la procédure de mesure de référence principale (voir JCGM 200:2012, 2.8 [79]) d'étalonnage des **hydrophones** dans des conditions de **champ libre** faisant appel au principe de réciprocité.

Ajouter la nouvelle note suivante:

NOTE La condition de champ libre peut être obtenue dans une étendue d'eau confinée en suivant diverses procédures de mesure, telles que l'utilisation de giclées de tonalité (onde sinusoïdale à déclenchement périodique – voir 10.5.3), de la spectrométrie de temporisation [63, 68], de la fluctuation de la longueur d'onde («chirp») modulée en fréquence [80, 81] ou d'autres techniques [82].

9.4 Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

9.4.1 Appareils

Remplacer le titre et le texte du paragraphe existant comme suit:

9.4.1 Transducteurs auxiliaires

Il convient d'utiliser des transducteurs auxiliaires à piston plan circulaire pour générer le champ ultrasonique dans la plage de fréquences concernée, limitée à la plage maximale comprise entre 1 MHz et 15 MHz. La surface active d'émission (A_{ER}) doit être déterminée, conformément à l'IEC 61689, pour chaque transducteur et pour toutes les fréquences auxquelles le transducteur est destiné à être utilisé. Si une fluctuation de la longueur d'onde modulée en fréquence doit être utilisée comme signal d'excitation, l' A_{ER} doit être déterminée au moins pour la fréquence minimale, maximale et pour une fréquence intermédiaire de la plage concernée.

La position de la dernière amplitude de pression acoustique minimale le long de l'axe de symétrie, d_m , doit être déterminée avec une incertitude inférieure ou égale à 1 mm. Il faut la déterminer selon un balayage de ligne sur un axe, conformément à l'IEC 61689, pour les mêmes fréquences que A_{ER} . La distance du champ proche produite par le transducteur auxiliaire est définie par $N_1 = a_t^2/\lambda$, où λ est la longueur d'onde ultrasonore dans l'eau à la fréquence de fonctionnement et $a_t = \sqrt{2\lambda d_m + \lambda^2}$ est le rayon efficace du transducteur ultrasonique.

NOTE Des transducteurs auxiliaires à focalisation peuvent être utilisés, mais il est nécessaire d'appliquer plusieurs corrections, et le présent document est uniquement destiné aux transducteurs à piston plan. Une mise en œuvre détaillée de la méthode d'étalonnage par réciprocité utilisant des transducteurs à focalisation est présentée dans le document de référence [84].

La surface active d'émission (A_{ER}) est utilisée dans les équations de l'Annexe K pour évaluer correctement la correction de diffraction et le coefficient de réciprocité pour les ondes planes, tandis que la dernière amplitude de pression minimale le long de l'axe de symétrie (d_m) est utilisée pour définir indirectement la distance du champ proche (N_1), soit $N_1 = (2\lambda d_m + \lambda^2)/\lambda$. Bien que les deux grandeurs A_{ER} et d_m soient directement liées pour des transducteurs parfaits, elles doivent être déterminées de manière expérimentale conformément à l'IEC 61689.

9.4.2 Mode opératoire

Remplacer le titre et le texte du paragraphe existant comme suit:

9.4.2 Réflecteur

Il convient que le réflecteur se compose d'une surface plate dont la plus petite dimension linéaire doit être au moins égale à quatre fois le rayon efficace du transducteur ultrasonique a_t . Le réflecteur doit également être plat à $\pm 10 \mu\text{m}$, avec un état de surface correct à $\pm 5 \mu\text{m}$ (rugosité de surface: $R_v < 5 \mu\text{m}$; $R_p < 5 \mu\text{m}$; $R_a < 1 \mu\text{m}$). L'épaisseur du réflecteur doit être telle que la première réflexion provenant de la surface arrière ne gêne pas celle provenant directement de la surface avant pour tout signal d'excitation utilisé. Une attention particulière doit être portée aux fluctuations de longueur d'onde modulées en fréquence à giclées longues ou à faible débit, en particulier aux plus basses fréquences concernées.

Le coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau R_{RT} doit être déterminé de manière expérimentale, par exemple par la relation $R_{RT} = (Z_{RT} - \rho c)/(Z_{RT} + \rho c)$, où ρc est l'impédance acoustique caractéristique de l'eau et Z_{RT} est l'impédance acoustique caractéristique du réflecteur.

NOTE R_v est la profondeur maximale d'un creux, R_p est la hauteur maximale d'un pic et R_a est la moyenne arithmétique décrivant les paramètres d'amplitude de rugosité du profil du réflecteur.

Ajouter les nouveaux paragraphes suivants:

9.4.3 Champ de mesure

Le transducteur auxiliaire et l'hydrophone ayant tous les deux une ouverture finie, un diagramme de diffraction est présent dans le champ ultrasonique. Pour réduire le plus possible les incertitudes dues aux corrections analytiques ou numériques applicables aux grandeurs de mesure, la mesure la plus proche doit être réalisée au moins à $0,9 \times N_1$, et la distance la plus lointaine ne doit pas être supérieure à $2,2 \times N_1$. La surface eau-air et les parois du réservoir doivent être suffisamment éloignées de la trajectoire ultrasonore pour qu'aucune forme d'onde réfléchie n'interfère avec la forme d'onde directe au niveau du point de mesure.

Si une structure quelconque est trop proche de la trajectoire de la forme d'onde ultrasonore directe, elle doit être recouverte d'un revêtement absorbant afin de réduire le plus possible l'interférence avec le signal de mesure, et le problème d'interférence doit être intégré dans le budget d'incertitude.

9.4.4 Approche réciproque

La réciprocité peut être établie comme l'une des principales méthodes d'étalonnage d'un **hydrophone** si certains éléments pratiques et théoriques sont adoptés. L'Annexe K décrit les principes fondamentaux de l'approche réciproque.

9.4.5 Procédure de mesure

Plusieurs montages distincts (voir Annexe K [83, 84, 85]) sont susceptibles d'être utilisés concernant le positionnement des trois éléments principaux de la méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs: le transducteur auxiliaire, le réflecteur et l'**hydrophone**.

Quelle que soit la configuration adoptée, l'autoétalonnage du transducteur auxiliaire constitue la première étape, destinée à quantifier la pression acoustique générée par le transducteur au niveau d'un point défini du champ ultrasonique.

Annexe K (informative)

Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

Remplacer l'Annexe K existante, ajoutée par l'Amendement 1, par le texte ci-dessous:

K.1 Généralités

La méthode de réciprocité à deux transducteurs implique l'évaluation de la pression acoustique en un point défini du champ ultrasonique. Pour ce faire, la première étape consiste à évaluer le champ ultrasonique généré par un transducteur auxiliaire. Au cours de la deuxième étape, l'élément actif de l'**hydrophone** est placé de manière à permettre l'étalonnage au niveau d'un point défini pour lequel la pression acoustique peut être définie aussi précisément que possible.

K.2 Principes fondamentaux de la réciprocité

Un transducteur réversible possède une réponse apparente de transmission au courant $S_t^*(\omega)$ et une réponse apparente de réception en tension $M_t^*(\omega)$ définies comme suit

$$S_t^* = \frac{p_0(\omega)}{I_t(\omega)} \text{ et } M_t^* = \frac{U_t(\omega)}{p_i(\omega)} \quad (\text{K.1})$$

où p_0 est la pression acoustique générée par le transducteur auxiliaire à sa surface, I_t est l'émission en courant du transducteur, p_i est la pression acoustique incidente sur la surface du transducteur et U_t est la tension générée par le transducteur en mode réception.

NOTE Le terme 'pression acoustique' est utilisé dans l'Annexe K, bien qu'il soit reconnu qu'en pratique, cette grandeur varie dans l'espace. De même, la puissance électrique des dispositifs à transducteur utilisés en mode réception dépendra de la pression acoustique moyennée dans l'espace sur leur surface active.

Si le transducteur est réciproque, le coefficient de réciprocité pour les ondes planes J_p est associé à $S_t^*(\omega)$ et $M_t^*(\omega)$ par la relation suivante:

$$J_p = \frac{M_t^*(\omega)}{S_t^*(\omega)}. \quad (\text{K.2})$$

Par définition, $J_p = \frac{2A_{ER}}{\rho c} I_p = \frac{2A_{ER}}{\rho c}$.

Si l'onde générée par un transducteur réciproque se propage dans l'eau et se reflète avec une incidence normale au niveau d'une cible située à une distance d_1 de la surface du transducteur placée sur son axe de symétrie, elle produit une onde incidente dont la pression acoustique peut être mesurée par le transducteur réciproque. La définition est associée à l'Equation (K.3)

$$p_i(\omega) = p_0(\omega) R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt} \quad (\text{K.3})$$

où α est le coefficient d'atténuation d'amplitude des ondes planes dans l'eau et G_{tt} est la correction due au fait que la forme d'onde en retour est générée et mesurée par un

transducteur fini, c'est-à-dire qu'elle tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et est reliée à la génération et à la réception par le transducteur. En combinant les Equations (K.1), (K.2) et (K.3), la pression acoustique générée par un transducteur réciproque à sa surface est associée aux grandeurs électriques et géométriques par la relation suivante:

$$p_0(\omega) = \sqrt{U_t(\omega) I_t(\omega) \frac{\rho c}{2A_{ER} R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt}}} . \quad (K.4)$$

Une réflexion d'incidence normale sur le réflecteur est nécessaire pour l'autoétalonnage. Il est possible de l'obtenir en optimisant la réflexion de la forme d'onde provenant du réflecteur mesuré par le transducteur. Le courant électrique induit I_t est mesuré en plaçant le transducteur auxiliaire en mode de sortie. La tension d'entrée U_t est mesurée quand le transducteur auxiliaire est en mode d'entrée. Il convient que la tension soit en circuit ouvert, et il est recommandé d'appliquer des corrections électriques au courant et à la tension mesurés.

Consécutivement, l'élément actif de l'**hydrophone** est placé en un point déterminé du champ ultrasonique, et la pression acoustique est optimisée afin d'assurer l'alignement de l'axe de symétrie de l'élément actif de l'**hydrophone** et de l'axe de symétrie du transducteur. La pression acoustique au niveau de ce point est calculée au moyen de la relation suivante:

$$p_h(\omega) = p_0(\omega) e^{-\alpha d_h} G_{th} \quad (K.5)$$

où p_h est la pression acoustique mesurée incidente sur l'élément actif de l'**hydrophone** si l'**hydrophone** était retiré, d_h est la distance entre la surface du transducteur et l'élément actif de l'hydrophone mesurée sur l'axe de symétrie, et G_{th} est la correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération par le transducteur et la réception par l'**hydrophone**.

Il convient de mesurer la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** U_h , p_h étant incident sur son élément actif. La sensibilité en bout de câble est donc donnée par

$$M(\omega) = \frac{U_h(\omega)}{p_h(\omega)} \quad (K.6)$$

K.3 Grandeurs électriques

L'émission en courant, I_t , doit être mesurée aussi précisément que possible, ce qui est réalisable de plusieurs manières. Mesure de la chute de tension aux bornes d'une impédance étalonnée ou utilisation d'une sonde de courant constituent des montages électriques typiques.

La tension de sortie du transducteur en mode réception, U_t , doit être mesurée sans charge par le transducteur, c'est-à-dire comme une tension en circuit ouvert. Pour ce faire, il est possible de mesurer le courant sur un court-circuit remplaçant le transducteur. La tension en circuit ouvert est

$$U_t(\omega) = U_{load}(\omega) \frac{I_{sc}(\omega)}{I_t(\omega)} \quad (K.7)$$

où U_{load} est la tension mesurée en couplant le transducteur au système et I_{sc} est le courant mesuré sur une liaison en court-circuit remplaçant le transducteur.

Dans le cas d'une charge constante supposée tout au long du processus d'étalonnage, les corrections décrites dans l'Annexe C sont susceptibles d'être appliquées directement à la sensibilité finale évaluée.

K.4 Correction de la diffraction et perte due à la propagation sonore non linéaire

En raison de la taille finie des transducteurs auxiliaires et des **hydrophones**, un diagramme de diffraction se développe dans le champ ultrasonique. Dans la méthode réciproque à deux transducteurs, deux corrections de diffraction sont appliquées: G_{th} , correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération d'une forme d'onde par le transducteur et à la réception par l'**hydrophone**, et G_{tt} , correction due à la génération et la réception par le transducteur. De nombreuses références peuvent être utilisées pour décrire théoriquement la perte par diffraction dans les champs ultrasoniques [83, 86, 87], et une application numérique de corrections de diffraction peut être appliquée [88, 89, 90, 91].

K.5 Champ ultrasonique

Pour l'étalonnage réciproque à deux transducteurs, le champ ultrasonique est marqué par l'influence de plusieurs aspects, principalement:

- le diagramme de diffraction pour le transducteur auxiliaire et pour l'hydrophone (voir K.3);
- le type de signal (voir l'Annexe G et [8, 80]);
- le coefficient de réflexion du réflecteur (voir 9.4.2);
- l'atténuation du parcours de l'eau (voir [92]);
- la vitesse du son (voir [36]).

Le coefficient d'atténuation d'amplitude pour les ondes ultrasonores planes, α , dans la plage de fréquences en mégahertz est proportionnel à f^2 , et il convient de le considérer à partir de l'ajustement polynomial en fonction de la température T dans la plage de températures comprises entre 0 °C et 60 °C [92]:

$$\alpha / f^2 = \left(\begin{array}{l} 5,685 \cdot 10^1 - 3,025 \cdot 10^0 \{T\} \\ + 1,174 \cdot 10^{-1} \{T\}^2 - 2,954 \cdot 10^{-3} \times \{T\}^3 \\ + 3,970 \cdot 10^{-5} \{T\}^4 - 2,111 \cdot 10^{-7} \{T\}^5 \end{array} \right) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} \quad (\text{K.8})$$

NOTE 1 $\{T\}$ représente la valeur numérique de la température en °C.

NOTE 2 Si le coefficient d'atténuation d'amplitude en m^{-1} est donné en dB m^{-1} , il convient de multiplier sa valeur numérique par $20 \cdot \log_{10}(e) = 8,69$.

La vitesse du son est présentée dans les tableaux de la référence [36], et les ajustements polynomiaux sont disponibles pour différentes précisions, plages de températures et pressions barométriques. Il convient de tenir compte du budget d'incertitude lors du choix de la formule utilisée pour l'évaluation de la vitesse sonore.

- a) Plage de températures: 0 °C à 100 °C à la pression atmosphérique; précision supérieure à 0,02 ms⁻¹ (voir [93])

$$c = \left(\begin{aligned} &1402,39 + 5,03836 \{T\} - 0,0581173 \{T\}^2 \\ &+ 3,34638 \cdot 10^{-4} \{T\}^3 - 1,48260 \cdot 10^{-6} \{T\}^4 \\ &+ 3,16585 \cdot 10^{-9} \{T\}^5 \end{aligned} \right) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.9})$$

- b) Plage de températures: 10 °C à 40 °C à la pression atmosphérique; précision supérieure à 0,18 ms⁻¹ (voir [93])

$$c = (1405,03 + 4,624 \{T\} - 0,0383 \{T\}^2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.10})$$

- c) Plage de températures: 15 °C à 35 °C à la pression atmosphérique; précision supérieure à 0,20 ms⁻¹ (voir [94])

$$c = (1404,3 + 4,7 \{T\} - 0,04 \{T\}^2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.11})$$

Pour la dépendance à la pression atmosphérique de la vitesse du son, se reporter à la référence [95].

K.6 Montage expérimental

K.6.1 Généralités

Différentes configurations expérimentales ont été proposées pour réaliser un étalonnage réciproque à deux transducteurs. Indépendamment du montage électrique, la principale préoccupation dans le cadre de la préparation expérimentale concerne le positionnement du transducteur auxiliaire, du réflecteur et de l'**hydrophone**. Trois montages expérimentaux sont décrits, chacun présentant des avantages et des inconvénients.

K.6.2 Réflecteur pivotant

La Figure K.1 décrit une configuration dans laquelle le réflecteur pivote entre les deux étapes de la procédure d'étalonnage. Il convient d'éviter d'appliquer un angle de rotation important au réflecteur. Une valeur maximale de 10° serait acceptable, mais il convient de tenir compte de l'incertitude de mesure de la tension de l'**hydrophone** due à une réflexion non normale. De plus, pour les **hydrophones** à large membrane, la définition d'un angle de rotation réduit pourrait constituer un point négatif. Le fait qu'il peut être difficile de faire pivoter avec la précision appropriée des réflecteurs de taille et de poids importants en acier inoxydable constitue un autre aspect négatif de cette configuration.

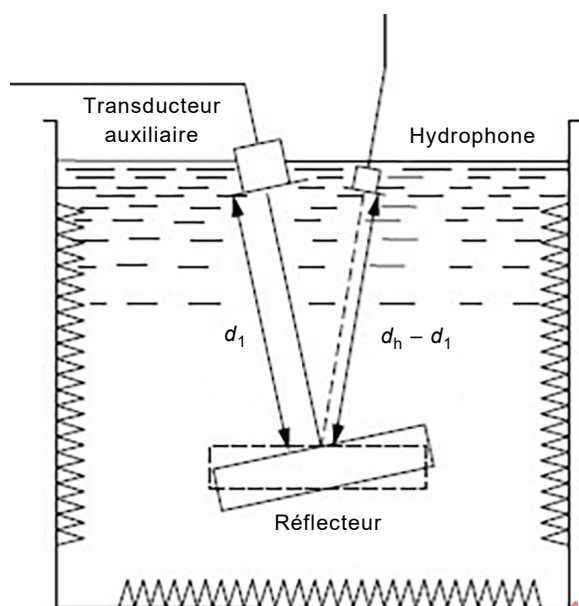


Figure K.1 – Montage expérimental avec un réflecteur pivotant [83]

K.6.3 Réflecteur translationnel

La Figure K.2 présente une configuration dans laquelle le réflecteur est inséré dans la trajectoire entre le transducteur auxiliaire et l'hydrophone.

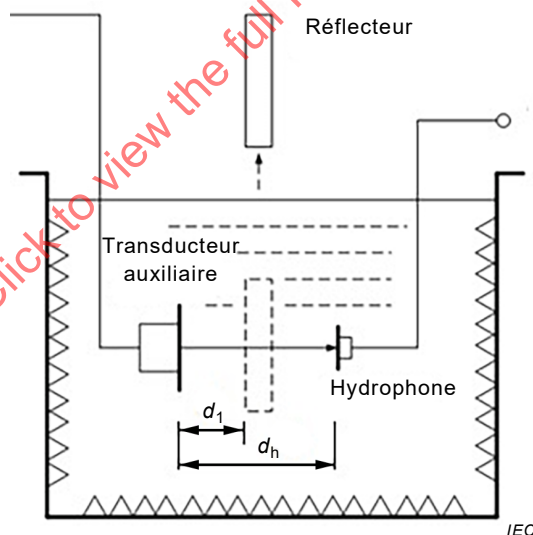


Figure K.2 – Montage expérimental avec réflecteur translationnel [84]

K.6.4 Transducteur auxiliaire translationnel

Dans la Figure K.3, l'hydrophone et le réflecteur restent immobiles durant la procédure de mesure, et l'élément mobile est le transducteur.