

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

### AMENDMENT 1 AMENDEMENT 1

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AMD1:2013



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI 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](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://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.

#### Useful links:

IEC publications search - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

The advanced search enables you 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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://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](mailto:csc@iec.ch).

### A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

#### Liens utiles:

Recherche de publications CEI - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI 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.

Just Published CEI - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://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](mailto:csc@iec.ch).

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

AMENDMENT 1  
AMENDEMENT 1

**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

PRICE CODE  
CODE PRIX

T

ICS 11.040.50

ISBN 978-2-83220-616-4

**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:

|             |                  |
|-------------|------------------|
| FDIS        | Report on voting |
| 87/519/FDIS | 87/527/RVD       |

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 web site 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.

---

Replace throughout the document:  
"non-linear" by "nonlinear",  
This replacement applies to the English text only.

Replace throughout the document:  
"non-linearity" by "nonlinearity"  
This replacement applies to the English text only.

Replace throughout the document:  
"non-linearities" by "nonlinearities"  
This replacement applies to the English text only.

Replace throughout the document:  
"non-linearly" by "nonlinearly"  
This replacement applies to the English text only.

## 2 Normative references

Replace the references to IEC 60050-801:1994, IEC 61161:2006, IEC 61828:2006 and IEC 62127-1, by the following new references:

IEC 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

IEC 61161, *Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*

IEC 61828, *Ultrasonics – Focusing transducers – Definitions and measurement methods for the transmitted fields*

IEC 62127-1:2007, *Ultrasonics - Hydrophones - Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz*  
Amendment 1:2013

### 3 Terms, definitions and symbols

#### 3.9

##### **effective radius of a non-focused ultrasonic transducer**

*Replace the term by **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer***

*Replace the term in the Note by **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer***

#### 3.14

##### **external transducer aperture**

*Replace, in Note 1, "Figure 2" by "Figure 1".*

#### 3.15

##### **far field**

*Replace the existing text of the definition (not including Note 1 and Note 2) by the following:*

region of the field where  $z > z_T$  aligned along the **beam axis** for planar non-focusing transducers.

*Add the following new Note 3:*

NOTE 3 If the shape of the transducer aperture produces several **transition distances**, the one furthest from the transducer shall be used.

[SOURCE: IEC 62127-1:2007/Amendment 1:2013, definition 3.28]

#### 3.23

##### **instantaneous intensity**

*Replace the existing text of Note 1 by the following:*

NOTE 1 **Instantaneous intensity** is the product of **instantaneous acoustic pressure** and particle velocity. It is difficult to measure intensity in the ultrasound frequency range. For the measurement purposes referred to in this International Standard and under conditions of sufficient distance from the **external transducer aperture** (at least one transducer diameter, or an equivalent transducer dimension in the case of a non-circular transducer) the **instantaneous intensity** can be approximated by the **derived instantaneous intensity**.

*Replace the existing text of Note 2 by the following:*

**Instantaneous intensity** is expressed in watts per square metre ( $\text{W/m}^2$ )

*Add the following new definitions:*

#### 3.26

##### **derived instantaneous intensity**

approximation of the **instantaneous intensity**

For the measurement purposes referred to in this International Standard, and under conditions of sufficient distance from the transducer (at least one transducer diameter, or an equivalent transducer dimension in the case of a non-circular transducer) the **derived instantaneous intensity** is determined by

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho c} \quad (1)$$

where:

$p(t)$  is the **instantaneous acoustic pressure**;

$\rho$  is the density of the medium;

$c$  is the speed of sound in the medium.

NOTE 1 For measurement purposes referred to in this International Standard, the **derived instantaneous intensity** is an approximation of the **instantaneous intensity**.

NOTE 2 Increased uncertainty should be taken into account for measurements very close to the transducer.

NOTE 3 **Derived instantaneous intensity** is expressed in watts per square metre (W/m<sup>2</sup>).

[SOURCE: IEC 62127-1:2007/ Amendment 1:2013, definition 3.78]

### 3.27

#### **effective wavelength**

$\lambda$

longitudinal speed of sound in the propagation medium divided by the **arithmetic-mean working frequency**

NOTE **Effective wavelength** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2001, definition 4.2.24].

### 3.28

#### **longitudinal plane**

plane defined by the **beam axis** and a specified orthogonal axis

NOTE See Figure 1 in IEC 62127-1.

[SOURCE: IEC 62127-1:2007, definition 3.35].

### 3.29

#### **source aperture plane**

closest possible measurement plane to the **external transducer aperture**, that is perpendicular to the **beam axis**

[SOURCE: IEC 61828:2001, definition 4.2.67].

### 3.30

#### **source aperture width**

$L_{SA}$

in a specified **longitudinal plane**, the greatest –20 dB **beamwidth** along the line of intersection between the designated **longitudinal plane** and the **source aperture plane**

NOTE 1 See Figure 2 in IEC 61828 2001.

NOTE 2 **Source aperture width** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 61828, definition 4.2.68].

**3.31****transducer aperture width** **$L_{TA}$** 

full width of the transducer aperture along a specified axis orthogonal to the beam axis of the unsteered beam at the centre of the transducer

NOTE 1 See Figure 4 in IEC 62127-1.

NOTE 2 **Transducer aperture width** is expressed in metres (m).

[SOURCE:IEC 62127-1:2007/ Amendment 1:2013, definition 3.87].

**3.32****transition distance** **$z_T$** 

for a given **longitudinal plane**, the **transition distance** is defined based on the transducer design (when known) or from measurement:

- from design: the **transition distance** is the equivalent area of the ultrasonic **transducer aperture width** divided by  $\pi$  times the **effective wavelength**,  $\lambda$ ;
- for measurements, the **transition distance** is the equivalent area of the **source aperture width** divided by  $\pi$  times the **effective wavelength**.

NOTE 1 Using method a), an unapodized **ultrasonic transducer** with circular symmetry about the **beam axis**, the equivalent area is  $\pi a^2$ , where  $a$  is the radius. Therefore the **transition distance** is  $z_T = a^2/\lambda$ . For the first example of a square **ultrasonic transducer**, the equivalent area is  $(L_{TA})^2$ , where  $L_{TA}$  is the **transducer aperture width** in the **longitudinal plane**. Therefore, the **transition distance** for both orthogonal **longitudinal planes** containing the sides or **transducer aperture widths**, is  $z_T = (L_{TA})^2 / (\pi\lambda)$ . For the second example, for a rectangular **ultrasonic transducer** with **transducer aperture widths**  $L_{TA1}$  and  $L_{TA2}$ , the equivalent area for the first linear transducer aperture width for the purpose of calculating the **transition distance** for the associated **longitudinal plane** is  $(L_{TA1})^2$ , where  $L_{TA1}$  is the **transducer aperture width** in this **longitudinal plane**. Therefore, the **transition distance** for this plane is  $z_{T1} = (L_{TA1})^2 / (\pi\lambda)$ . For the orthogonal **longitudinal plane** that contains the other **transducer aperture width**,  $L_{TA2}$ , the equivalent area for the other for the purpose of calculating the transition distance for the associated **longitudinal plane** is  $(L_{TA2})^2$ , where  $L_{TA2}$  is the **transducer aperture width** in this **longitudinal plane**. Therefore, the **transition distance** for this plane is  $z_{T2} = (L_{TA2})^2 / (\pi\lambda)$ .

NOTE 2 Using method b) for measurements in a longitudinal plane, the source aperture width,  $L_{SA}$ , in the same plane is used in  $z_T = (L_{SA})^2 / (\pi\lambda)$ .

NOTE 3 **Transition distance** is expressed in metre (m).

[SOURCE IEC 61828:2001, definition 4.2.75, modified: There is significant difference in the layout of the definition]

**4 List of symbols**

Replace:

$a_t$  **effective radius of a non-focused ultrasonic transducer**

by

$a_t$  **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer**

Add the following new symbols:

$L_{TA}$  **transducer aperture width**

$L_{SA}$  **source aperture width**

$z_T$  **transition distance**

## 5 Overview of calibration procedures

### 5.3 Reporting of results

*Add, after the sixth bullet point ("in situations where the mounting arrangement...") the following new Note 5 and renumber existing Notes 5 and 6 accordingly:*

NOTE 5 Care should be taken in designing the **hydrophone** mount at low frequencies (below 200 kHz) where the acoustic wavelengths are sufficiently large that the use of long-bursts may lead to the direct acoustic signal being contaminated by reflections from the mount. The importance of the effect may be investigated through varying the burst length and observing the influence of reflections on the **hydrophone** signal. Acoustic absorbers may be useful in suppressing these reflections. **Hydrophone** sensitivity may also be affected by the way the **hydrophone** is clamped, and again this may be evaluated by systematically investigating the various configurations.

## 6 Generic requirements of a hydrophone calibration system

### 6.1 Mechanical positioning

#### 6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position

*Add, after Note 1, the following new Note 2 and renumber existing Notes 3 and 4 accordingly.:*

NOTE 2 The distance of the **hydrophone** from the transducer can be estimated from a knowledge of the time elapsed between the electrical excitation applied to the transducer and the arrival time of the acoustic wave at the **hydrophone**, through a knowledge of the speed of sound in water at that particular temperature.

#### 6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position

*Replace the existing first sentence of the subclause by the following:*

The variation of the **hydrophone** output voltage should be checked when the lateral **hydrophone** position is changed to ensure that the signal is maximized.

### 6.3 Hydrophone size

*Number the existing note as Note 1 and add the following new Note 2:*

NOTE 2 Guidance in assessing the influence of spatial-averaging on calibrations may be found in IEC 62127-1 and Annex J.

### 6.4 Measurement vessel and water properties

*Replace the existing first paragraph with the following:*

The test tank shall be sufficiently large to allow the establishment of free field conditions at the lowest frequency of interest. It should also be large enough to allow the transducer-**hydrophone** separation to be varied to a degree consistent with the requirements of the applied calibration technique.

## 7.2 Earthing

*Add the following new note:*

NOTE This condition may be relaxed when a tone burst is used such that the acoustic signal arrives at the **hydrophone** after the electrical excitation is completed.



### 7.3.5 Cross-talk (radio-frequency *rf* pick-up) and acoustic interference

*Add, after the second paragraph, the following new Note 1 and renumber the existing note as Note 2:*

NOTE 1 In these situations, cross-talk will contaminate the direct acoustic signal. The effect can be evaluated through varying the tone-burst length and observing any consequent changes in the hydrophone waveform using an oscilloscope.

## 8.2 Wetting

*Replace the existing text by the following:*

The user shall ensure that the **hydrophone** is wetted properly and that all air bubbles are removed from the **hydrophone** and faces taking active part in the calibration. After measurements are completed, the active faces shall again be inspected, and the measurements shall be discarded if any air bubbles are found.

## 9 Free field reciprocity calibration

### 9.4 Two-transducer reciprocity calibration method

*Add the following new note:*

NOTE Within this standard, information on this calibration technique is also presented in Annex K and is provided for information purposes.

#### 9.4.2 Procedure

*Replace the existing text by the following:*

In the configuration, the auxiliary transducer is calibrated and then the reflector is removed to calibrate the **hydrophone**.

When calibrating the auxiliary transducer, rotate the reflector through an angle of approximately 10° about an axis parallel to its surface and perpendicular to the line joining the acoustic centres of the **hydrophones** and auxiliary transducer.

NOTE This method has been improved through a coaxial configuration of the **hydrophone** and the auxiliary transducer with the reflector in the middle of them. This can avoid the error caused by rotation of the reflector and make the alignment of the **hydrophone** and the auxiliary transducer easier, and the error can be reduced to about 0,5 dB.

### 10.5.3 Measurement conditions

*Replace, in the Note, the terms "effective radius of a non-focused ultrasonic transducer" by "effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer".*

### 12.5.1 Measurement (Type 1): determination of the directional response of a hydrophone

*Replace the existing Note 4 by the following:*

NOTE 4 The **effective hydrophone radius** is important for the assessment of spatial averaging effects (see Annex J and IEC 62127-1). The **effective hydrophone radius** might be frequency dependent for some types of

**hydrophone** and for any particular **hydrophone** might be dependent on the chosen axis. Further information on the **effective hydrophone radius** may be found in IEC 62127-3.

## **Annex D – Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique**

### **D.3.6 Noise**

*Replace, in the first sentence of the first paragraph, the term "beam axis centre" by "beam axis".*

## **Annex E – Properties of water**

*Add, at the end of the existing text, the following new sentence:*

Procedures to prepare degassed water are given in IEC/TS 62781.

## **Annex F – The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry up to 40 MHz**

### **F.2.3.1.4 Multipass effects in the foil**

*Replace, in the last sentence of the subclause "transmission factor,  $T$ ," by "transmission factor,  $TF$ ,".*

## **Annex G – Waveform concepts**

### **G.5.2 Influence of edge-waves**

*Replace, in the first sentence, "transducer,  $x$ ," by "transducer,  $z$ ,".*

## **Annex I – Determination of the phase response of hydrophones**

### **I.1 Overview**

*Add, at the end of the penultimate sentence in the first paragraph, the following bibliographic references [76], [77], [78]*

*Add, after Annex J, the following new annex:*

## **Annex K** (informative)

### **Two-transducer reciprocity calibration method**

#### **K.1 Overview**

A number of techniques are described in technical literature addressing the absolute determination of acoustic field parameters. The absolute determination of acoustic pressure amplitude at a single point within an acoustic field may be accomplished through the use of a calibrated hydrophone. The choice of technique used to calibrate the hydrophone may be made in terms of the resultant accuracy and convenience of applying the method. For example, whilst the optical interferometry described in Annex F represents a direct primary-standard method where the lowest calibration uncertainties can be achieved, it is highly demanding in terms of the facility requirements and it may be difficult to establish. Of the other hydrophone calibration methods, the two which have found most favor are reciprocity and planar scanning (see Annex D), the latter involving the measurement of total power in combination with the acoustic beam profile measured using a hydrophone.

The reciprocity technique involves measurement of the effect of the field on a second transducer (for the two-transducer method), or even the transducer generating the acoustic field (for the self-reciprocity method). The technique requires a relatively simple experimental facility compared to the two alternative methods: optical interferometry and planar scanning, and does not involve complex measurement procedures. It can therefore be established in any laboratory equipped for routine ultrasonic measurements. All of the measurements involved are electrical and the technique therefore can be made absolute, if indirect, as it does not involve the realization of the acoustic pascal. Nevertheless, electrical and acoustical corrections must be applied to the data, and the analysis of the results is rather complicated.

The now obsolete standard, IEC 60866, 1987, described detailed procedures to be followed in order to perform reciprocity calibration. For the reasons described above, it is considered valuable to include a virtual copy of the IEC 60866 descriptions within the present standard.

#### **K.2 Additional terms, definitions and symbols**

For the purpose of this annex, the following terms and definitions apply.

##### **K.2.1**

##### **reversible transducer**

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

[SOURCE: IEC 60565:2006, definition 3.26]

##### **K.2.2**

##### **reciprocal transducer**

linear, passive and reversible transducer

[SOURCE: IEC 60565:2006, definition 3.24]

##### **K.2.3**

##### **open-circuit voltage at hydrophone**

**$U$**

voltage appearing at the electrical terminals of a **hydrophone** when no current passes through the terminals

NOTE **Open-circuit voltage at hydrophone** is expressed in volt (V).

[SOURCE: IEC 60565:2006, definition 3.19]

#### K.2.4

##### **free-field sensitivity of a hydrophone**

**M**

ratio of the open circuit voltage of the **hydrophone** to the sound pressure in the undisturbed free field in the position of the **reference centre** of the **hydrophone** if the **hydrophone** were removed

NOTE 1 The pressure is sinusoidal.

NOTE 2 The term 'response' is sometimes used instead of 'sensitivity'.

NOTE 3 **Free-field sensitivity of a hydrophone** is expressed in volt per pascal (V/Pa).

[SOURCE: IEC 60565:2006, definition 3.15 ]

#### K.2.5

##### **transmitting response to current of a projector**

**S**

at a given frequency, the ratio of the acoustic pressure in the sound wave, at a point to be specified, in the absence of interference effects, to the current flowing through the electrical terminals of a projector

NOTE **Transmitting response to current of a projector** is expressed in pascal per ampere (Pa/A).

#### K.2.6

##### **reciprocity coefficient**

**J**

for any system in which a reciprocal transducer acts as a projector and receiver, the ratio of the free-field voltage sensitivity of the transducer, *M*, to its transmitting response to current, *S*; where the transmitted sound waves approximate plane waves, the reciprocity coefficient approaches  $2A/\rho c$  and is called the plane wave reciprocity coefficient

NOTE 1 The plane wave reciprocity coefficient applies to plane wave propagation, as realized in the far field of a transducer, but pure far field conditions are not used in the procedure described in K.5.6. To cope with this, a correction factor is described in K.4.4 which includes an allowance for deviations from plane wave conditions.

NOTE 2 **Reciprocity coefficient** is expressed in watt per squared pascal ( $W/Pa^2$ )

#### K.2.7

##### **end-of-cable leakage resistance**

**$R_L$**

the ratio of the voltage across the electrical terminals at the end of the **hydrophone** cable to the direct current flowing through these terminals

NOTE 1 The value of the voltage used during the determination of the  $R_L$  should be stated.

NOTE 2 **End-of-cable leakage resistance** is expressed in ohm ( $\Omega$ )

#### K.2.8

##### **mechanical Q of hydrophone element**

the ratio of the resonance frequency to the bandwidth between the two frequencies at which the motional impedance of the **hydrophone** is  $1/\sqrt{2}$  times that at resonance

### K.3 List of symbols used in this annex

$A_1$  Effective area of auxiliary transducer

*a* Effective radius of the **hydrophone**

|                  |                                                                                                                                      |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_1$            | Effective radius of auxiliary transducer                                                                                             |
| $a_u$            | Factor by which the reference voltage $U_{\text{ref}}$ must be reduced to make it equal to voltage $U$                               |
| $a_{u1}$         | Factor by which the reference voltage $U_{\text{ref}}$ must be reduced to make it equal to voltage $U_1$                             |
| $a_{11}$         | Factor by which the reference voltage $U_{\text{ref}}$ must be reduced in order to drive a current $I_1$ through the impedance $R_0$ |
| $c$              | Speed of sound in a medium (usually water)                                                                                           |
| $d$              | Distance between <b>hydrophone</b> and reflector                                                                                     |
| $d_1$            | Distance between auxiliary transducer and reflector                                                                                  |
| $G_1$            | Correction factor for diffraction loss with auxiliary transducer alone                                                               |
| $G_2$            | Correction factor for diffraction loss with auxiliary transducer and <b>hydrophone</b>                                               |
| $G_c$            | Correction factor combining $G_1$ and $G_2$ , applicable only under certain measurement conditions                                   |
| $I_1$            | Current through auxiliary transducer                                                                                                 |
| $I_k$            | Current through short circuit introduced in place of the auxiliary transducer                                                        |
| $J$              | Reciprocity coefficient                                                                                                              |
| $J_p$            | { = $2 A/\rho c$ } Reciprocity coefficient for plane waves                                                                           |
| $k_{u1}$         | Correction to open-circuit voltage for the auxiliary transducer                                                                      |
| $k_u$            | Correction to open-circuit voltage at a <b>hydrophone</b>                                                                            |
| $M$              | Free-field sensitivity of a <b>hydrophone</b>                                                                                        |
| $M^*$            | Apparent free-field sensitivity of a <b>hydrophone</b> , assuming ideal plane wave measurement conditions                            |
| $N$              | Near field distance                                                                                                                  |
| $p$              | Sound pressure                                                                                                                       |
| $p_1$            | Sound pressure in plane wave omitted by auxiliary transducer                                                                         |
| $R_0$            | Impedance of standard load equal to the characteristic impedance of the precision attenuator                                         |
| $R_L$            | End-of-cable leakage resistance of <b>hydrophone</b>                                                                                 |
| $r$              | Amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface                                                                   |
| $s$              | { = $(d_1 + d)/a_1^2$ } Normalized distance from auxiliary transducer to <b>hydrophone</b>                                           |
| $S$              | Transmitting response to current of a projector                                                                                      |
| $S_1$            | Transmitting response to current of auxiliary transducer                                                                             |
| $S_1^*$          | Apparent transmitting response to current of auxiliary transducer, assuming ideal plane wave measurement conditions                  |
| $U$              | Open-circuit voltage at a <b>hydrophone</b>                                                                                          |
| $U_1$            | Open-circuit voltage for auxiliary transducer                                                                                        |
| $U_{\text{ref}}$ | Reference voltage                                                                                                                    |
| $v$              | Velocity of the radiating surface of the transducer                                                                                  |
| $z$              | Distance along the acoustic axis from the transducer                                                                                 |
| $\alpha$         | Amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water)                                                         |
| $\lambda$        | Ultrasonic wavelength                                                                                                                |
| $\rho$           | (mass) Density of the measurement liquid (water)                                                                                     |

## K.4 Principle of the two-transducer reciprocity method

### K.4.1 General

The recommended calibration procedure is based on the principles presented in K.4.2 to K.4.4.

### K.4.2 Transmitting current response by self-reciprocity

A plane, reciprocal transducer (parameters relating to which will be identified by the suffix 1) is first calibrated by the self-reciprocity method (see K.9). Its apparent transmitting current response assuming ideal plane wave measurement conditions,  $S_1^*$ , is determined by measuring the current,  $I_1$ , and the received signal voltage,  $U_1$ , by means of the following relationship (Equation K.20):

$$S_1^* = \frac{p_1}{I_1} = \left( \frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \quad (\text{K.1})$$

and

$$J_p = \frac{2 A_1}{\rho c} \quad (\text{K.2})$$

where:

$p_1$  is the acoustic pressure in the plane wave emitted by transducer 1;

$J_p$  is the reciprocity coefficient for plane waves;

$A_1$  is the effective area of the surface of transducer 1;

$\rho$  is the density of the propagation medium (water);

$c$  is the speed of sound in the propagation medium.

The acoustic pressure in the plane wave field transmitted by transducer 1 is then known as a function of the current.

### K.4.3 Free-field voltage sensitivity by substitution

The **hydrophone** to be calibrated is immersed in the known sound field generated by transducer 1, and its output open-circuit voltage  $U$  determined. The apparent free-field voltage sensitivity, assuming ideal plane wave measurement conditions,  $M^*$ , is then given by:

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \left( \frac{I_1 J_p}{U_1} \right)^{1/2} \quad (\text{K.3})$$

### K.4.4 Correction for non-plane wave conditions

It is not generally possible to realize either plane (or spherical) wave reciprocity conditions at the ultrasonic frequencies being considered here, because of the size of available, practical transducers compared with the wavelengths of the acoustic waves, and because of the relatively high acoustic absorption in water at these frequencies. In practice, an intermediate

condition is used and allowance made for the frequency-dependent changes, such as diffraction and attenuation, which affect the acoustic wave during its propagation between projector and receiver. This allowance takes the form of a correction factor,  $k$ , applied during the calculation of the calibration results, where  $M = M^*k$ . The correction factor is based largely on the theoretical model of the pressure distribution in the field emitted by a plane, circular piston-like source, in which the velocity at any time is identical at all points on the radiating surface (see Clause K.11).

NOTE The theory of the two-transducer reciprocity method has been described in detail in reference [1] in Clause K.12.

## K.5 Calibration measurement conditions

### K.5.1 Overall experimental arrangement

Figure K.1, illustrates the experimental arrangement required for this method of calibration, and Figure K.2 shows the associated electrical circuits in their simplest form. The auxiliary transducer 1 radiates repetitive tone bursts of between 10 and 20 cycles into a water tank, where they are reflected by a thick stainless steel reflector. For the self-reciprocity calibration of the auxiliary transducer, the transducer is adjusted to a position in which the axis of the emitted ultrasonic beam is perpendicular to the reflecting surface; and for the second stage, the calibration of the **hydrophone**, the reflector is inclined so as to bring the **hydrophone** into the centre of the reflected acoustic field. The transducer and **hydrophone** should be arranged so that the angle of reflection used in the second stage is less than  $10^\circ$  to avoid significant departure in the value of the reflection coefficient from that at normal incidence.

### K.5.2 The auxiliary transducer

The auxiliary transducer should have a plane, circular active face of diameter at least ten times the wavelength of sound in water at the frequency for which the transducer will be used, and should satisfy the conditions laid down in K.5.4 as to its suitability for use in reciprocity calibration procedures. Furthermore, the transducer should be chosen for its ability to radiate a field which conforms closely to that predicted theoretically for a plane, piston-like source.

NOTE As a guide to the selection of suitable auxiliary transducers, it is recommended that experimentally determined value of effective radius,  $a_1$  (see K.5.3), should not differ from the true, physical radius of the active element of any chosen transducer by more than +2 % to –5 %.

Although one auxiliary transducer may be capable of satisfactory operation over a limited range of frequencies, a set of transducers will in general be required to cover the full calibration bandwidth.

### K.5.3 The effective radius of the auxiliary transducer

The effective radius of the auxiliary transducer,  $a_1$ , is the radius of the equivalent piston-like source for which the spatial distribution of acoustic pressure amplitude in the far field most closely resembles that from the transducer itself. The effective radius is determined from a plot of acoustic pressure amplitude as a function of position along the beam axis, obtained by means of a **hydrophone** (details of the experimental method recommended for the determination of the effective radius are covered in K.10.1).

### K.5.4 Checking the suitability of a transducer for use in reciprocity procedures

In practice, it is sufficient to check the applicability of particular transducers to reciprocity calibration procedures as follows. The transducers are checked in pairs, one being used as a projector and the other as a receiver. A comparison is made between the ratios of the open-circuit output voltage of the receiver to the input current of the projector when the functions of the projector and receiver are interchanged without changing their positions. These two values should not differ by more than 10 %. If the difference is larger, at least one of the



transducers is not performing satisfactorily. Comparison of both transducers with a third reversible transducer will in general reveal which one is at fault.

NOTE If the transducers are identical in construction they can be linear or nonlinear to the same extent and yet seem reciprocal by the tests outlined above. Therefore these tests should be performed using several different types for the second transducer before the first can be assumed to be suitable for use in reciprocity calibration procedures. See reference [2] in Clause K.12.

#### K.5.5 The reflector

The reflector should comprise a stainless steel disk of sufficient diameter to encompass the entire ultrasonic beam from any of the auxiliary transducers at a distance from its surface of at least 1,5 times the near field distance, given by  $N_1 = a_1^2 / \lambda$ , where  $a_1$  is the effective radius of the transducer, and  $\lambda$  the acoustic wavelength in water at its frequency of operation. The thickness of the reflector should be such that the first reflection from the rear surface will not interfere with that directly from the front surface for the lowest frequency tone burst to be used. The reflector should also be flat to  $\pm 10 \mu\text{m}$ , with a surface finish good to  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

#### K.5.6 Sound path

During the calibration procedures, it is recommended that the total length of the sound path from the transducer back to the transducer via the reflector ( $2d$  in Figure K.1), and from the transducer to the **hydrophone** ( $d + d_1$ ), should lie between 1,5 and 3 times the near-field distance  $N_1$  for the particular auxiliary transducer in use.

NOTE A total path length of between  $1,5 N_1$  and  $3 N_1$  is found to be most convenient for the determination of the correction factor (see K.4.3). The use of larger measuring distances, particularly at frequencies above 5 MHz, would require a significant correction to be applied to the results obtained to take account of attenuation in the propagation liquid, and measurements carried out within the near-field distance are subject to considerable uncertainty arising from complicated interference structure in the sound field.

#### K.5.7 The test tank

The test tank should be sufficiently large to allow the distance between the auxiliary transducer and the reflector to be set at a value equal to at least 1,5 times the near-field distance for any of the transducers to be used. The walls of the tank and water surface should be at a sufficient distance from the transducer and **hydrophone** to ensure that any signal resulting from reflections at these surfaces will be delayed with respect to the principal, direct signal by a time at least equivalent to the duration of the lowest frequency tone burst to be used. Furthermore, where possible, such surfaces should be lined with acoustically absorbent materials such as rubber or thick-pile, woollen carpet, and set at an angle of at least  $10^\circ$  to the plane of the reflector itself.

The tank should be filled with freshly distilled or degassed water, which, because of the continuous absorption of air from the atmosphere, should be replaced at intervals not exceeding 48 h.

NOTE Water may be degassed by exposure to an atmosphere of air at a pressure reduced to no more than 2 000 Pa, or by heating to approximately  $80^\circ\text{C}$  for 1 h (See also IEC/TR 62781).

#### K.5.8 Alignment

Precise positioning and orientation of the transducer, **hydrophone** and reflector are required and these components, therefore, should be mounted in stable, rigid supports, which allow the appropriate adjustments to be made. It is recommended that the **hydrophone** and transducer be equipped with a means of setting their lateral positions to an accuracy of  $\pm 0,1 \text{ mm}$ , and that independent adjustment of their orientations about their acoustic centres be possible to an accuracy of  $\pm 0,05^\circ$  or better. The reflector is required to rotate through an angle of approximately  $10^\circ$  about an axis parallel to its surface and perpendicular to the line joining the acoustic centres of the **hydrophones** and auxiliary transducer (see Figure K.1).



## K.6 Experimental method

To avoid the use of calibrated voltage and current meters, which cannot in general be applied directly to the measurement of tone burst signals, it is recommended that  $I_1$ ,  $U_1$  and  $U$  are measured in terms of a reference voltage,  $U_{\text{ref}}$ , and a known resistance,  $R_0$ , by means of a precision attenuator of output impedance equal to  $R_0$ . Then:

$$U_1 = a_{u1} U_{\text{ref}} \quad (\text{K.4})$$

$$U = a_u U_{\text{ref}} \quad (\text{K.5})$$

$$I_1 = \frac{a_{i1} U_{\text{ref}}}{R_0} \quad (\text{K.6})$$

where:

$a_{u1}$ ,  $a_u$  and  $a_{i1}$  are proportionality constants

Substitution of (K.4, K.5 and K.6) in (K.3) yields:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{i1}} \left( \frac{R_0 a_{i1} J_p}{a_{u1}} \right)^{1/2} \quad (\text{K.7})$$

so that the absolute value of the free-field sensitivity of the **hydrophone** can be determined without a knowledge of  $U_{\text{ref}}$ , provided  $U_{\text{ref}}$  remains constant during the period of the measurement, and provided the absolute value  $R_0$  is known. It is recommended that the value of  $R_0$  should be known to  $\pm 1\%$  over the frequency range for which it is to be used.

Details of the experimental procedures recommended for the determination of  $a_{u1}$ ,  $a_u$  and  $a_{i1}$  are given in K.10.2.

## K.7 Calculation of results

### K.7.1 The correction factor, $k$

In calculating the results of the calibration measurements, allowance must be made for any differences between the ideal boundary conditions assumed in the derivation of equation (K.7) and those used in practice. As described in K.4.3, this may be achieved by the introduction of a correction factor,  $k$ , where the true free-field sensitivity of the **hydrophone** is given by  $M^* k$ .

A full evaluation of the correction factor is described in Clause K.11. However, under certain specific conditions, consistent with the calibration procedures recommended in this standard, a significant simplification can be achieved. These conditions are:

- that the ratio of the diameter of the auxiliary transducer to that of the **hydrophone** is greater than 5, and
- that all measurements are performed at total acoustic path lengths between 1,5 and 3 times the near-field distance of the auxiliary transducer.

By defining a normalized distance,  $s$ , as the acoustic path length between the auxiliary transducer and **hydrophone** divided by the near-field distance, condition  $b$ ) may be summarized as:

$$1,5 < \frac{2d_1\lambda}{a_1^2} < 3 \quad (\text{K.8})$$

and

$$1,5 < s < 3 \quad (\text{K.9})$$

where:  $s = (d_1 + d)\lambda / a_1^2$

Under these conditions,  $k$  may be evaluated from the expression:

$$k = G_c \frac{k_{u1}^{1/2}}{k_u} \cdot e^{\alpha' d} \quad (\text{K.10})$$

where:

$G_c$  (a function of  $s$  only) allows for the changes in received signal due to diffraction effects occurring during propagation of the ultrasound as a beam rather than as an infinite, plane wave. These effects represent the departure of the real system from the plane wave conditions assumed in the derivation of  $J_p$ , and  $J_p G_c^2$  may be regarded as the reciprocity coefficient for the intermediate conditions used throughout the calibration measurements. The value of  $G_c$  as a function of  $s$  is plotted in Figure K.3.

$\alpha'$  is the amplitude attenuation coefficient for ultrasound in pure, degassed water, and has the value:

$$\alpha' = 2,2 \cdot 10^{-14} f^2 \text{Hz}^{-2} \text{m}^{-1} \quad (\text{K.11})$$

at a temperature of 23 °C.

$k_{u1}$  is the factor by which the signal voltage produced by the auxiliary transducer when acting as a receiver must be multiplied to give the equivalent open-circuit voltage. If the electrical load conditions (e.g. tone burst generator output impedance) are unchanged between transmission and reception, the value of  $k_{u1}$  may be determined by measuring the current  $I_k$ , through the circuit when the transducer is replaced by a short-circuit link. Then clearly:

$$k_{u1} = \frac{I_k}{I_1} \quad (\text{K.12})$$

NOTE If an electric gate is provided to isolate the generator from the transducer immediately after the tone burst is transmitted, and a high impedance detection circuit is used, the value of  $k_{u1}$  may be taken as unity.

$k_u$  is the factor by which the voltage produced by the **hydrophone** must be multiplied to give the equivalent open-circuit value. In general, the **hydrophone** will be calibrated with the electrical loading to be used during the **hydrophone's** subsequent application, and the correction to open-circuit voltage sensitivity will be unnecessary.

See references [4] to [10] in Clause K.12.

## K.8 Accuracy

The recommended calibration procedure and simplified correction factor provide a method of calibrating **hydrophones** in the 0,5 MHz to 15 MHz frequency band with a overall systematic uncertainty of less than  $\pm 1,5$  dB in voltage sensitivity level. The technique is capable of yielding statistical uncertainties in the measurements, which are significantly less than  $\pm 1,5$  dB.

See reference [3] in K.12.

## K.9 Plane wave reciprocity

A reciprocal transducer is one, which satisfies the electromechanical reciprocity condition:

$$\left| \frac{v}{I} \right| = \left| \frac{U}{F} \right| \quad (\text{K.13})$$

where: (in transmission)  $v$  is the uniform velocity of the radiating surface of the transducer for an input current  $I$  and (in reception)  $U$  is the open-circuit voltage produced by a force  $F$  acting on the transducer, assumed in this case to be rigid.

From the definitions of the transmitting response to current of a projector (see K.2.5) and the free-field sensitivity of a **hydrophone** (see K.2.4):

$$S = \left| \frac{p_{\text{tr}}}{I} \right| \text{ and } M = \left| \frac{U}{p_{\text{rec}}} \right| \quad (\text{K.14})$$

where:

$p_{\text{tr}}$  is the acoustic pressure in the sound wave immediately in front of the projector, in the absence of interference effects, for an input current  $I$

$p_{\text{rec}}$  is the acoustic pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the receiver, if it were removed, which gives an open-circuit voltage  $U$ .

For a plane wave, the pressure in front of the projector is related to the uniform surface velocity by the relationship:

$$p_{\text{tr}} = \rho c v \quad (\text{K.15})$$

where:

$\rho$  is the density of the propagation medium

$c$  is the speed of sound in the medium

If it is now assumed that the acoustic wave propagates between transmission and reception without loss or diffraction effects, as for example in an infinite plane wave travelling in a loss-free medium,

$$p_{\text{tr}} = p_{\text{rec}} = p \quad (\text{K.16})$$

The force exerted on the surface of the receiver, area  $A$ , is therefore given by:

$$F = 2Ap \quad (\text{K.17})$$

Hence, under the assumed plane wave boundary conditions, the ratio

$$\frac{M}{S} = \frac{UI}{p^2} = \frac{2A}{\rho c} = J_p \quad (\text{K.18})$$

depends only on the area of the transducer, and is identified as the plane wave reciprocity parameter  $J_p$ . With  $J_p$  known, a measurement of  $U$  and  $I$  leads directly to the determination of  $p$ , and thus  $S$  and  $M$ .

NOTE If  $I_1$  and  $U_1$  are the input current and received voltage for a real transducer transmitting and receiving a tone burst signal in water, reflected by a plane water/metal interface, then:

$$\frac{M_1^*}{S_1^*} = \frac{U_1 I_1}{p^2} = J_p \quad (\text{K.19})$$

where:

$M_1^*$  and  $S_1^*$  are the apparent values of the free-field voltage sensitivity and transmitting response to current of the transducer assuming ideal plane wave measurement conditions

Hence from equations (K.3) and (K.19):

$$S_1^* = \left( \frac{U_1}{I J_p} \right)^{1/2} \quad (\text{K.20})$$

In any practical measurement scheme at the frequencies under consideration here, true plane wave conditions cannot be realized, and allowance must be made for the difference between  $p_{tr}$  and the value of  $p_{rec}$  averaged over the active surface of the receiver.

## K.10 Details of the recommended experimental procedures

### K.10.1 Evaluation of the effective radius of the auxiliary transducer

The effective radius,  $a_1$ , of the auxiliary transducer is determined from a plot of the acoustic pressure amplitude against distance along the acoustic axis, when the transducer is operating in a continuous wave mode. This plot may be achieved by a measurement with an uncalibrated **hydrophone** in a tone burst field, provided the active element diameter of the **hydrophone** is at least a factor of ten less than that of the auxiliary transducer, and the tone burst is sufficiently long to allow steady-state conditions to be established. The experimentally determined acoustic distribution is compared with that predicted for a perfect piston-like source, that is, one in which the radiating surface moves with spatially uniform velocity,  $v$ . The radius of the theoretical source,  $a_1$ , is then adjusted for optimum agreement between the experimental data and the field model. The theoretical distribution for a piston-like source is given by expression:

$$\frac{p}{p_{tr}} = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[ \left( z^2 + a_1^2 \right)^{1/2} - z \right] e^{-\alpha' z_i} \right| \quad (\text{K.21})$$

where:

- $p$  is the acoustic pressure amplitude at a distance  $z$  along the acoustic axis from the transducer
- $p_{tr}$  is the plane wave pressure amplitude given by  $p_{tr} = \rho c v$
- $\lambda$  is the acoustic wavelength
- $a_1$  is the radius of the source, and
- $\alpha'$  is the amplitude attenuation coefficient for water at 23° C

In practice the values of both  $p_{tr}$  and  $a_1$  are adjusted for the optimum fit between the experimental and theoretical data.

NOTE One method of obtaining this fit is as follows: If  $Y_i(z_i)$  is defined as  $20 \log_{10} U_i$ , where  $U_i$  is the amplitude of the signal voltage produced by the **hydrophone** at a distance  $z_i$  from the transducer and  $Y'(z_i)$  is defined as:

$$20 \log_{10} \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} \left[ \left( z_i^2 + a_1^2 \right)^{1/2} - z_i \right] e^{-\alpha' z_i} \right| \quad (K.22)$$

then the parameter

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (K.23)$$

Where

$$X_i = Y_i(z_i) - Y'_i(z_i) - \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n Y_i(z_i) - \sum_{i=1}^n Y'_i(z_i) \right] \quad (K.24)$$

is minimized with respect to  $a_1$ . This fitting procedure is applied only to data for which  $z$  lies between 1,5  $z_m$  and 3  $z_m$ , where  $z_m$  is the value of  $z$  at the position of the pressure maximum furthest from the transducer surface. Having thus determined  $a_1$ , a check is made on the success of the model as a representation of the true field by evaluating  $X_m(z_m)$ . A magnitude of  $X_m(z_m)$  less than 0,5 dB is taken to indicate that the model is satisfactory.

### K.10.2 Evaluation of the voltage reduction factors

The voltage reduction factors  $a_{u1}$ ,  $a_u$  and  $a_{ll}$  are all determined by means of single precision attenuator, used between the reference voltage source and its known standard load  $R_0$ . (See Figure K.2).

For  $a_{u1}$ , the voltage dropped across  $R_0$  is displayed alternately with  $U_1$  on an oscilloscope, and the attenuator is set by inspection to that value for which the signals are of equal amplitude. By such means the attenuator setting provides a direct measure of  $a_{u1}$ . Similarly  $a_u$  is determined by comparing the voltage across  $R_0$  with  $U$ .

The value of  $a_{ll}$  is also determined by setting the attenuator, but in this case the two signals to be compared and equated by this adjustment are the current into the transducer and the current through  $R_0$ . These are monitored by arranging for them to pass alternately through the same current probe, the output of which is displayed on the oscilloscope. An absolute calibration of the current probe is, not required.

NOTE 1 In the simple circuit shown in Figure K.2, the same tone burst generator is used to drive the transducer and to provide  $U_{ref}$ . If this arrangement is used in practice, it will be found convenient to place a second

attenuator between switch **SW A** and the transducer to allow the drive current to be adjusted independently of  $U_{\text{ref}}$ .

The detailed experimental procedures necessary when making use of the circuit configuration illustrated in Figure K.2 is as follows:

- i) With the reflector set to return the transmitted tone burst to the auxiliary transducer and switches **SW B** and **SW C** both in position 1,  $a_{11}$  is determined by setting the attenuator for equal signal voltages monitored at the two positions of switch **SW A**.
- ii) With the reflector and switch **SW B** set as for item i), **SW C** is then switched to position 2 and  $a_{u1}$  determined by again setting the attenuator for equal signals at the two positions of switch **SW A**.

NOTE 2 In this case, the signal monitored in position 1 is  $U_1$ , and this will of course be delayed with respect to the time of the source tone burst by an amount equal to the transit time of the acoustic pulse in the water tank. A suitably delayed trigger will therefore be required.

- iii) With the reflector adjusted to direct the centre of the reflected field towards the **hydrophone**, the procedures detailed in items i) and ii) above are repeated. This provides a second measurement of  $a_{11}$  and a corresponding value of  $a_u$ . By using this value of  $a_{11}$  in the square root term of equation (K.7), as given in Clause K.6, it is not necessary for the reference voltage  $U_{\text{ref}}$  to be held constant during the adjustment of the reflector.

To ensure that the reflected beam is centred on either the transducer, for items i) and ii), or on the **hydrophone**, for item iii), it is important to adjust the positions of these components carefully for a maximum detected signal. Adjustment should be made both of the positions of the devices in the planes perpendicular to the direction of propagation of the incident acoustic waves, and of their orientations about their acoustic centres. It is important that these adjustments be made to an accuracy of at least the acoustic wavelength and  $0,05^\circ$  respectively.

### K.11 Evaluation of the correction factor, $k$

A more general correction factor than that described in Clause K.7 is given by the expression:

$$k = \left( \frac{k_{u1} G_1}{r} \right)^{1/2} \cdot \frac{e^{\alpha' d}}{k_u G_2} \quad (\text{K.25})$$

where:

$G_1$  is the correction necessary to take account of changes in the acoustic wave between transmission and reception during the self-reciprocity calibration of the auxiliary transducer

$G_2$  is the correction necessary to take account of equivalent changes during calibration of the **hydrophone** in the known field generated by the auxiliary transducer

$r$  is the amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface, and the other parameters are as defined in Clause K.7

The value of  $G_1$  or  $G_2$  appropriate to any experimental system is equal to the ratio of the acoustic pressure averaged over the surface of the receiver (or **hydrophone**) to that in the plane wave immediately in front of the transmitter (in the absence of interference) as a function of the acoustic path length. A logarithmic plot of this ratio,  $|p/p_0|$ , against the normalized distance derived theoretically for various receiver/transmitter diameter ratios was given for an ideal piston-like source by reference [7] in Clause K.12. These results are shown in Figure K.4 (The normalized distance is the distance from the transducer surface divided by the near-field distance). The value of  $G_1$  relates to the auxiliary transducer in use as both a

transmitter and receiver, and is obtained from the plot corresponding to a diameter ratio unity.  $G_2$  relates to the wave transmitted by the auxiliary transducer and received by the **hydrophone**, and the plot corresponding to the appropriate diameter ratio must be used. If the recommendations in this standard are followed, then this ratio will in all cases be less than 0,2.

The value of  $(1/r)$  for a water/stainless steel interface is 1,033.

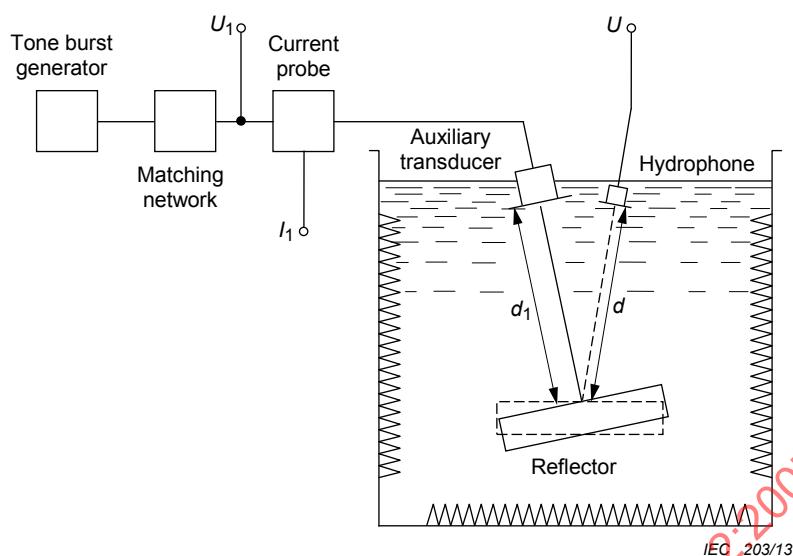
Other terms used in the correction factor are covered in K.6.

NOTE 1 Figure 4 gives the ratio  $|p/p_0|$  in decibels

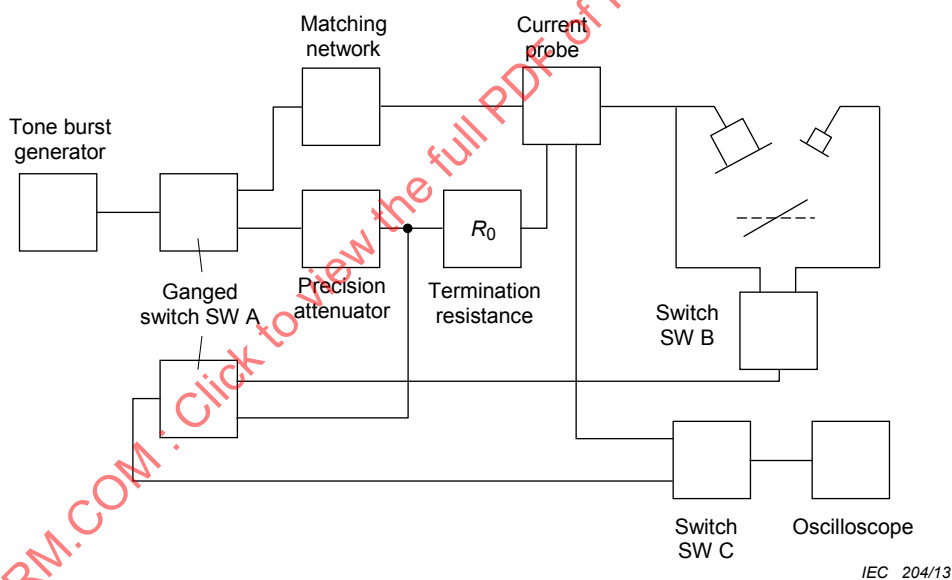
NOTE 2 For applications in which the **hydrophone** is used in a medium other than that in which it is calibrated, an additional correction term may be necessary.

## K.12 Bibliography

- [1] BEISSNER, K. Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field. *Acustica*, 1980, 46, p.162.
- [2] BRENDL, K., LUDWIG, G. Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers. *Acustica*, 1976, 36, p.203.
- [3] GLOERSEN, W. B., HARRIS, G. R., STEWART, H. F., LEWIN, P. A. A Comparison of Two Calibration Methods for Ultrasonic Hydrophones. *Ultrasound Med. Biol.*, 1982, 8, pp.545-548.
- [4] YAGHJIAN, A. D. Generalized or Adjoint Reciprocity Relations for Electroacoustic Transducers. *J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.)*, 1975, 79B, p.17.
- [5] BRENDL, K., LUDWIG, G. Korrekturen bei der Kalibrierung von Ultraschall-Sondenmikrophonen. *Fortschritte der Akustik*, DAGA '76; VDI – Verlag Düsseldorf, 1976, p.393.
- [6] GITIS, M. B., KHIMUNIN, A. S. Diffraction Effects in Ultrasonic Measurements (Review). *Sov. Phy.-Acoust.*, 1969, 14, p.413.
- [7] FAY, B. Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern. *Acustica*, 1976, 36, p.209.
- [8] KHIMUNIN, A. S. Numerical Calculation of the Diffraction Corrections for the Precise Measurement of Ultrasound Absorption. *Acustica*, 1972, 27, p.173.
- [9] BRENDL, K., LUDWIG, G. Measurement of Ultrasonic Diffraction Loss for Circular Transducers. *Acustica*, 1975, 32, p.110.
- [10] PINKERTON, J. M. M. A Pulse Method for the Measurement of Ultrasonic Absorption in Liquids Results for Water. *Nature*, 1947, 160, p. 128.

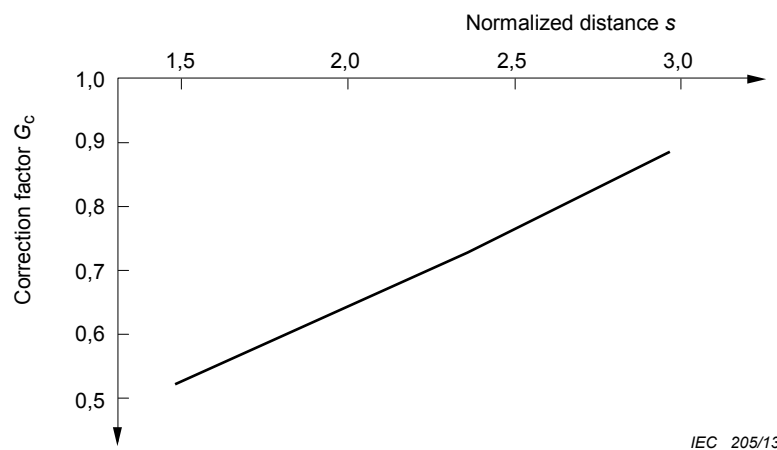


**Figure K.1 – Experimental arrangement for the two-transducer reciprocity calibration method**

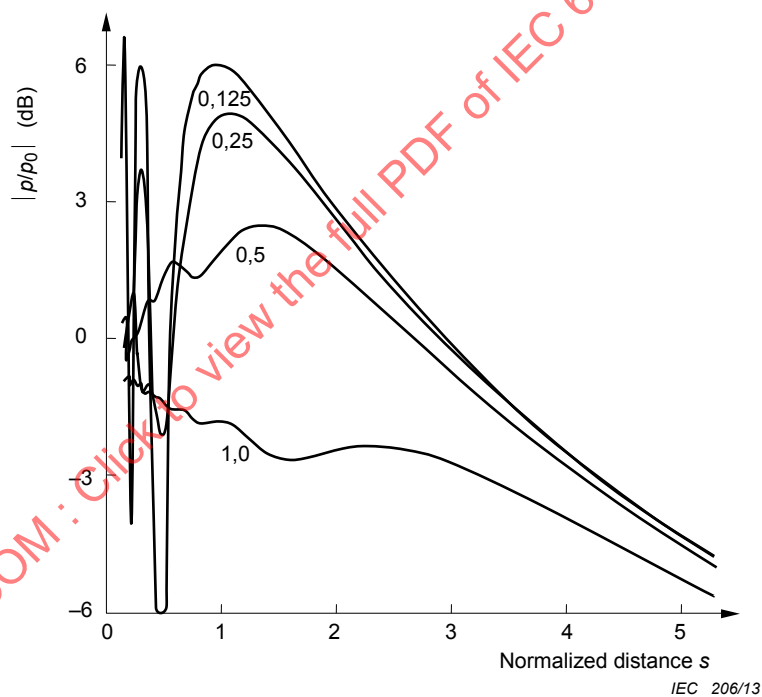


**Figure K.2 – Block diagram of the electrical circuit for the two-transducer reciprocity calibration method.**





**Figure K.3 – The value of the term  $G_c$  (part of the correction factor  $k$ ) plotted as a function of the normalized distance.**



**Figure K.4 – Average pressure plotted against normalized distance for transducers of different size. Parameter is the ratio receiver/transmitter diameter (according to reference [7] in Clause K.12)**

## Bibliography

*Add the following new references:*

- [76] WEAR K., GAMMELL P., MARUVADA S., LIU Y., and HARRIS G. Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response. *IEEE Trans UFFC*. 11/2011; 58(11):2325-33
- [77] BLOOMFIELD P., GANDHI G., and LEWIN P. Membrane hydrophone phase characteristics through nonlinear acoustics measurements. *IEEE Trans UFFC*. 11/2011; 58(11):2418-37
- [78] BLOOMFIELD P., GANDHI G., and LEWIN P. Nonlinear acoustics determination of phase characteristics of PVDF membrane hydrophones. *J. Phys: Conf. Ser.* 279 012001

*Add a new heading and the following references:*

### Related IEC documents

IEC 60050-802, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 802: Ultrasonics*

IEC/TS 62781 *Ultrasonics – Conditioning of water for ultrasonic measurements*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AM1:2013

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2007/AMD1:2013

## AVANT-PROPOS

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

Le texte de cet amendement est issu des documents suivants:

| FDIS        | Rapport de vote |
|-------------|-----------------|
| 87/519/FDIS | 87/527/RVD      |

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 cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI 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

Remplacer les références à la CEI 60050-801:1994, CEI 61161:2006 et CEI 61828:2006 par les nouvelles références suivantes:

CEI 60050-801, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

CEI 61161, *Ultrasons – Mesurage de puissance – Balances de forces de rayonnement et exigences de fonctionnement*

CEI 61828, *Ultrasons – Transducteurs focalisants – Définitions et méthodes de mesurage pour les champs transmis*

CEI 62127-1:2007, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux jusqu'à 40 MHz*  
Amendement 1:2013

## 3 Termes, définitions et symboles

### 3.9

**rayon efficace d'un transducteur ultrasonique non focalisé**

Remplacer le terme par **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation**

Remplacer le terme dans la Note par **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation**

**3.14****ouverture du transducteur externe**

*Remplacer, dans la Note 1, "Figure 2" par "Figure 1".*

**3.15****champ lointain**

*Remplacer le texte existant de la définition (sans inclure la Note 1 et la Note 2) par le texte suivant:*

région du champ où  $z > z_T$  est alignée sur l'**axe du faisceau** pour des transducteurs plans sans focalisation

*Ajouter la nouvelle Note 3 suivante:*

NOTE 3 Si la forme de l'ouverture du transducteur génère plusieurs **distances de transition**, la distance la plus éloignée du transducteur doit être utilisée.

[SOURCE: CEI 62127-1:2007/ Amendement 1:2013, définition 3.28]

**3.23****intensité instantanée**

*Remplacer le texte existant de la Note 1 par le suivant:*

NOTE 1 L'**intensité instantanée** est le produit de la **pression acoustique instantanée** et de la vitesse acoustique. Il est difficile de mesurer l'intensité dans la gamme de fréquences ultrasoniques. Pour les besoins des mesures auxquelles fait référence la présente Norme internationale et dans des conditions de distance suffisante de l'**ouverture du transducteur externe** (au moins un diamètre de transducteur ou une dimension de transducteur équivalente dans le cas d'un transducteur non circulaire), l'**intensité instantanée** peut être approchée par l'**intensité instantanée dérivée**.

*Remplacer le texte existant de la Note 2 par le texte suivant:*

L'**intensité instantanée** est exprimée en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>)

*Ajouter les nouvelles définitions suivantes:*

**3.26****intensité instantanée dérivée**

approximation de l'**intensité instantanée**

Pour les besoins des mesures auxquelles fait référence la présente Norme internationale, et dans des conditions de distance suffisante du transducteur (au moins un diamètre de transducteur, ou une dimension de transducteur équivalente dans le cas d'un transducteur non circulaire), l'**intensité instantanée dérivée** est déterminée par

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho c} \quad (1)$$

où:

$p(t)$  est la **pression acoustique instantanée**;

$\rho$  est la densité du milieu;

$c$  est la vitesse du son dans le milieu.

NOTE 1 Pour les besoins des mesures auxquelles fait référence la présente Norme Internationale, l'**intensité instantanée dérivée** est une approximation de l'**intensité instantanée**.

NOTE 2 Il convient de prendre en compte l'incertitude augmentée pour les mesures très proches du transducteur.

NOTE 3 L'intensité instantanée dérivée est exprimée en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ).

[SOURCE: CEI 62127-1:2007/ Amendement 1:2013, définition 3.78]

### 3.27

#### longueur d'onde effective

$\lambda$

vitesse du son longitudinale dans le milieu de propagation divisée par la **fréquence de fonctionnement moyenne arithmétique**

NOTE La **longueur d'onde effective** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: CEI 61828:2001, définition 4.2.24].

### 3.28

#### plan longitudinal

plan défini par l'**axe du faisceau** et un axe orthogonal spécifié

NOTE Voir Figure 1 de la CEI 62127-1.

[SOURCE: CEI 62127-1:2007, définition 3.35].

### 3.29

#### plan d'ouverture de la source

plan de mesurage le plus proche possible de l'**ouverture externe du transducteur** et perpendiculaire à l'**axe du faisceau**

[SOURCE: CEI 61828:2001, définition 4.2.67].

### 3.30

#### largeur d'ouverture de la source

$L_{SA}$

dans un **plan longitudinal** spécifié, **largeur de faisceau** –20 dB la plus importante le long de la ligne d'intersection entre le **plan longitudinal** désigné et le **plan d'ouverture de la source**

NOTE 1 Voir Figure 2 de la CEI 61828 2001.

NOTE 2 La **largeur d'ouverture de la source** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: CEI 61828, définition 4.2.68].

### 3.31

#### largeur d'ouverture du transducteur

$L_{TA}$

largeur complète de l'ouverture du transducteur selon un axe spécifié orthogonal à l'axe du faisceau du faisceau non guidé au centre du transducteur

NOTE 1 Voir Figure 4 de la CEI 62127-1.

NOTE 2 La **largeur d'ouverture du transducteur** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: CEI 62127-1:2007/ Amendement 1:2013, définition 3.87].

**3.32****distance de transition** **$z_T$** 

pour un **plan longitudinal** donné, la **distance de transition** est définie sur la base du calcul du transducteur (si connu) ou à partir de mesures:

- a) pour le calcul: la **distance de transition** est la surface équivalente de la **largeur d'ouverture du transducteur** ultrasonique divisée par  $\pi$  fois la **longueur d'onde effective**,  $\lambda$ ;
- b) pour les mesures: la **distance de transition** est la surface équivalente de la **largeur d'ouverture source** divisée par  $\pi$  fois la **longueur d'onde effective**.

NOTE 1 Pour la méthode a), un **transducteur ultrasonique** non apodisé à symétrie circulaire autour de l'**axe de faisceau**, la surface équivalente est  $\pi a^2$ , où  $a$  est le rayon. Par conséquent, la **distance de transition** est  $z_T = a^2/\lambda$ . Pour le premier exemple d'un **transducteur ultrasonique** carré, la surface équivalente est  $(L_{TA})^2$ , où  $L_{TA}$  est la **largeur d'ouverture du transducteur** dans le **plan longitudinal**. Par conséquent, la **distance de transition** pour les deux **plans longitudinaux** orthogonaux contenant les côtés ou les **largeurs d'ouverture du transducteur**, est  $z_T = (L_{TA})^2 / (\pi\lambda)$ . Pour le second exemple, pour un **transducteur ultrasonique** rectangulaire avec des **largeurs d'ouverture du transducteur**  $L_{TA1}$  et  $L_{TA2}$ , la surface équivalente pour la première largeur d'ouverture linéaire du transducteur pour le calcul de la **distance de transition** pour le **plan longitudinal** associé est  $(L_{TA1})^2$ , où  $L_{TA1}$  est la **largeur d'ouverture du transducteur** dans ce **plan longitudinal**. Par conséquent, la **distance de transition** pour ce plan est  $z_{T1} = (L_{TA1})^2 / (\pi\lambda)$ . Pour le **plan longitudinal** orthogonal qui contient l'autre **largeur d'ouverture du transducteur**,  $L_{TA2}$ , la surface équivalente de l'autre pour le calcul de la distance de transition pour le **plan longitudinal** associé est  $(L_{TA2})^2$ , où  $L_{TA2}$  est la **largeur d'ouverture du transducteur** dans ce **plan longitudinal**. Par conséquent, la **distance de transition** pour ce plan est  $z_{T2} = (L_{TA2})^2 / (\pi\lambda)$ .

NOTE 2 Pour la méthode b) pour les mesures dans un plan longitudinal, la **largeur d'ouverture source**,  $L_{SA}$ , dans le même plan est utilisée dans  $z_T = (L_{SA})^2 / (\pi\lambda)$ .

NOTE 3 La **distance de transition** est exprimée en mètre (m).

[SOURCE CEI 61828:2001, définition 4.2.75, modifiée: Différence significative de la présentation de la définition]

**4 Liste des symboles**

Remplacer:

$a_t$  rayon efficace d'un transducteur ultrasonique non focalisé

par

$a_t$  rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation

Ajouter des nouveaux symboles suivants:

$L_{TA}$  largeur d'ouverture du transducteur

$L_{SA}$  largeur d'ouverture source

$z_T$  distance de transition

**5 Présentation des modes opératoires d'étalonnage****5.3 Déclaration des résultats**

Ajouter, après la sixième puce ("si la disposition du montage...") la nouvelle Note 5 suivante et renuméroter les Notes 5 et 6 existantes en conséquence:

NOTE 5 Il convient de porter la plus grande attention au montage de l'**hydrophone** aux basses fréquences (inférieures à 200 kHz) où les longueurs d'ondes acoustiques sont suffisamment grandes pour que l'utilisation de longues giclées de tonalité donne lieu à la pollution du signal acoustique direct du fait des réflexions du montage. L'importance de l'effet peut être étudiée en faisant varier la longueur de la giclée et en observant l'influence des réflexions sur le signal de l'**hydrophone**. Il peut être utile d'utiliser des absorbeurs acoustiques pour supprimer ces réflexions. La sensibilité de l'**hydrophone** peut également être affectée par les moyens de fixation de l'**hydrophone**, ceci peut également être évalué en examinant systématiquement les différentes configurations.

## 6 Exigences génériques d'un système d'étalonnage d'hydrophone

### 6.1 Positionnement mécanique

#### 6.1.2 Précision de la position axiale de l'hydrophone

*Ajouter, après la Note 1, la nouvelle Note 2 suivante et renuméroter les Notes 3 et 4 existantes en conséquence:*

NOTE 2 La distance entre l'**hydrophone** et le transducteur peut être évaluée sur la base de la connaissance du temps qui s'écoule entre le moment où l'excitation électrique est appliquée au transducteur et le moment où l'onde acoustique arrive au niveau de l'**hydrophone**, et de la connaissance de la vitesse du son dans l'eau à la température particulière considérée.

#### 6.1.3 Précision de la position latérale de l'hydrophone

*Remplacer la première phrase existante du paragraphe par la phrase suivante:*

Il convient de vérifier la variation de la tension de sortie de l'**hydrophone** lorsque la position latérale de l'**hydrophone** a varié afin de s'assurer de l'optimisation du signal.

### 6.3 Dimension de l'hydrophone

*La correction de la deuxième phrase du paragraphe ne concerne que le texte anglais..*

*Numéroter la note existante en tant que Note 1 et ajouter la nouvelle Note 2 suivante:*

NOTE 2 Des recommandations sur l'évaluation de l'influence de la moyenne spatiale sur les étalonnages peuvent être obtenues dans la CEI 62127-1 et à l'Annexe J.

### 6.4 Récipient de mesure et propriétés de l'eau

*Remplacer le premier alinéa existant par l'alinéa suivant:*

Le réservoir d'essai doit être suffisamment large pour établir des conditions en champ libre à la fréquence considérée la plus basse. Il convient qu'il soit également suffisamment large pour pouvoir faire varier la séparation entre transducteur et **hydrophone** dans une mesure qui soit cohérente avec les exigences de la technique d'étalonnage appliquée.

### 7.2 Mise à la masse

*Ajouter la nouvelle note suivante:*

NOTE Cette condition peut être assouplie lorsqu'une giclée de tonalité est utilisée de sorte que le signal acoustique arrive au niveau de l'**hydrophone** après application de l'excitation électrique.

#### 7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence *rf*) et interférence acoustique

*Ajouter, après le deuxième alinéa, la nouvelle Note 1 suivante et renuméroter la note existante en tant que Note 2:*



NOTE 1 Dans ces situations, la diaphonie pollue le signal acoustique direct. L'effet peut être évalué en faisant varier la longueur de la giclée de tonalité et en observant les changements de la forme d'onde de l'hydrophone au moyen d'un oscilloscope.

## 8.2 Humidification

*Remplacer le texte existant par le suivant:*

L'utilisateur doit s'assurer que l'**hydrophone** est humidifié correctement et que toutes les bulles d'air ont disparu de l'**hydrophone** et des faces qui participent activement à l'étalonnage. Une fois les mesures effectuées, les faces actives doivent faire l'objet d'un nouvel examen, et les mesures doivent être rejetées si la présence de bulles d'air est constatée.

## 9 Etalonnage réciproque en champ libre

### 9.4 Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

*Ajouter la nouvelle note suivante:*

NOTE La présente norme fournit également à titre informatif des informations sur cette technique d'étalonnage dans l'Annexe K.

#### 9.4.2 Mode opératoire

*Remplacer le texte existant par le texte suivant:*

Dans la configuration, le transducteur auxiliaire est étalonné, et le réflecteur est alors retiré pour étalonner l'**hydrophone**.

Lors de l'étalonnage du transducteur auxiliaire, faire pivoter le réflecteur selon un angle d'environ 10° par rapport à un axe parallèle à sa surface et perpendiculaire à la droite joignant les centres acoustiques des **hydrophones** et du transducteur auxiliaire.

NOTE Cette méthode a été améliorée par une configuration coaxiale de l'**hydrophone** et du transducteur auxiliaire, le réflecteur ayant été placé au milieu d'eux. Cela peut éviter les erreurs provoquées par la rotation du réflecteur et faciliter l'alignement de l'**hydrophone** et du réflecteur auxiliaire. L'erreur peut être réduite d'environ 0,5 dB.

#### 10.5.3 Conditions de mesure

*Remplacer, dans la Note, les termes "rayon efficace d'un transducteur ultrasonique non focalisé" par "rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation".*

### 12.5.1 Mesures (Type 1): détermination de la réponse directionnelle d'un hydrophone

*Remplacer la Note 4 existante par la note suivante:*

NOTE 4 Le **rayon efficace de l'hydrophone** est important pour évaluer les effets de la moyenne spatiale (voir Annexe J et CEI 62127-1). Le **rayon efficace** de certains types d'**hydrophone** peut dépendre de la fréquence et, pour des **hydrophones** particuliers, de l'axe choisi. De plus amples informations sur le **rayon efficace de l'hydrophone** peuvent être obtenues dans la CEI 62127-3.

## **Annexe D – Étalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique d'exploration planaire**

### **D.3.6 Bruit**

*Remplacer, dans la première phrase du premier alinéa, le terme "centre de l'axe du faisceau" par "axe du faisceau".*

## **Annexe E – Propriétés de l'eau**

*Ajouter, à la fin du texte existant, la nouvelle phrase suivante:*

Les modes opératoires de préparation de l'eau dégazée sont donnés dans la CEI/TS 62781.

## **Annexe F – Étalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique jusqu'à 40 MHz**

### **F.2.3.1.4 Effets de plusieurs passages dans la feuille**

*Remplacer, dans la dernière phrase du paragraphe, "facteur de transmission,  $T$ ," par "facteur de transmission,  $TF$ ".*

## **Annexe G – Concepts de forme d'onde**

### **G.5.2 Influence des ondes de bord**

*Remplacer, dans la première phrase, "x, du transducteur" par "z, du transducteur".*

## **Annexe I – Détermination de la réponse en phase des hydrophones**

### **I.1 Présentation**

*Ajouter, à la fin de l'avant-dernière phrase du premier alinéa, les références bibliographiques suivantes: [76], [77], [78]*

*Ajouter, après l'Annexe J, la nouvelle annexe suivante:*

## **Annexe K** (informative)

### **Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs**

#### **K.1 Présentation**

La documentation technique décrit de nombreuses techniques dédiées à la détermination absolue des paramètres de champ acoustique. La détermination absolue de l'amplitude de pression acoustique en un point unique d'un champ acoustique peut être réalisée par l'utilisation d'un hydrophone étalonné. La technique d'étalonnage de l'hydrophone peut être choisie en termes de la précision et de la commodité résultantes de l'application de la méthode. Par exemple, tandis que l'interférométrie optique décrite à l'Annexe F représente une méthode directe principale normalisée qui permet d'obtenir les incertitudes d'étalonnage les plus faibles, cette méthode est très exigeante en termes d'exigences d'installation, et peut être difficile à mettre en place. Parmi les autres méthodes existantes d'étalonnage des hydrophones, les deux méthodes qui se sont révélées les plus adaptées sont la méthode d'étalonnage par réciprocité et la méthode d'exploration planaire (voir Annexe D), la dernière méthode impliquant la mesure de la puissance totale combinée au profil du faisceau acoustique mesuré au moyen d'un hydrophone.

La technique de réciprocité implique la mesure de l'effet du champ sur un second transducteur (pour la méthode à deux transducteurs), voire le transducteur qui génère le champ acoustique (pour la méthode d'auto réciprocité). La technique exige une installation expérimentale relativement simple par rapport aux deux autres méthodes, à savoir l'interférométrie optique et l'exploration planaire, et ne nécessite pas de modes opératoires de mesure complexes. Elle peut par conséquent être établie dans tout laboratoire capable d'effectuer des mesures ultrasoniques courantes. Toutes les mesures réalisées sont de nature électrique et la technique peut de ce fait être absolue, si elle est indirecte, étant donné qu'elle n'implique pas d'obtenir une pression acoustique exprimée en pascals. Néanmoins, les données doivent faire l'objet de corrections d'ordre électrique et acoustique, et l'analyse des résultats est plutôt compliquée.

La norme CEI 60866:1987, désormais obsolète, décrivait des modes opératoires détaillés à appliquer afin de réaliser l'étalonnage par réciprocité. Il est considéré intéressant, pour les raisons décrites ci-dessus, d'inclure une reproduction virtuelle des descriptions de la CEI 60866 dans la présente norme.

#### **K.2 Termes, définitions et symboles supplémentaires**

Pour les besoins de la présente annexe, les termes et définitions suivants s'appliquent.

##### **K.2.1**

##### **transducteur réversible**

transducteur pouvant fonctionner aussi bien comme projecteur que comme **hydrophone**

[SOURCE: CEI 60565:2006, définition 3.26].

##### **K.2.2**

##### **transducteur réciproque**

transducteur linéaire, passif, réversible

[SOURCE: CEI 60565:2006, définition 3.24].

### K.2.3

#### tension en circuit ouvert d'un hydrophone

**$U$**

tension apparaissant aux bornes électriques d'un **hydrophone** non chargé électriquement

NOTE La **tension en circuit ouvert d'un hydrophone** est exprimée en volt (V).

SOURCE: CEI 60565:2006, définition 3.19].

### K.2.4

#### sensibilité en champ libre d'un hydrophone

**$M$**

rapport de la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** à la pression acoustique dans le champ libre non perturbé qui existerait à l'emplacement du **centre de référence** de l'**hydrophone** si ce dernier était retiré

NOTE 1 La pression est sinusoïdale.

NOTE 2 Le terme de 'réponse' est parfois employé à la place de 'sensibilité'.

NOTE 3 La **sensibilité en champ libre d'un hydrophone** est exprimée en volt par pascal (V/Pa).

[SOURCE: CEI 60565:2006, définition 3.15].

### K.2.5

#### réponse de transmission au courant d'un projecteur

**$S$**

à une fréquence donnée, quotient de la pression acoustique dans l'onde acoustique, en un point à spécifier, en l'absence d'effets d'interférence, par le courant circulant aux bornes électriques d'un projecteur

NOTE La **réponse de transmission au courant d'un projecteur** est exprimée en pascal par ampère (Pa/A).

### K.2.6

#### coefficient de réciprocité

**$J$**

pour tout système dans lequel un transducteur réciproque agit comme un projecteur et un récepteur, le quotient de la sensibilité de tension en champ libre du transducteur,  $M$ , par sa réponse de transmission au courant,  $S$ ; où les ondes acoustiques transmises avoisinent les ondes planes, le coefficient de réciprocité avoisine  $2A/\rho c$  et est désigné coefficient de réciprocité d'ondes planes

NOTE 1 Le coefficient de réciprocité d'ondes planes s'applique à la propagation d'onde plane, comme dans le champ lointain d'un transducteur, sans toutefois utiliser les conditions pures de champ lointain dans le mode opératoire décrit en K.5.6. A cet effet, un facteur de correction est décrit en K.4.4 qui comprend une tolérance pour les écarts par rapport aux conditions d'onde plane.

NOTE 2 Le **coefficient de réciprocité** est exprimé en watt par pascal carré ( $W/Pa^2$ )

### K.2.7

#### résistance aux fuites en bout de câble

**$R_L$**

quotient de la tension aux bornes électriques à l'extrémité du câble de l'**hydrophone** par le courant continu circulant à ces bornes

NOTE 1 Il convient de spécifier la valeur de la tension utilisée pour la détermination de  $R_L$ .

NOTE 2 La **résistance aux fuites en bout de câble** est exprimée en ohm ( $\Omega$ ).

**K.2.8****Q mécanique de l'élément d'hydrophone**

quotient de la fréquence de résonance par la largeur de bande entre les deux fréquences à laquelle l'impédance cinétique de l'**hydrophone** est de  $1/\sqrt{2}$  fois celle de la résonance

**K.3 Liste des symboles utilisés dans la présente annexe**

|          |                                                                                                                                    |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_1$    | Surface apparente du transducteur auxiliaire                                                                                       |
| $a$      | Rayon efficace de l' <b>hydrophone</b>                                                                                             |
| $a_1$    | Rayon efficace du transducteur auxiliaire                                                                                          |
| $a_u$    | Facteur par lequel la tension de référence $U_{ref}$ doit être réduite pour être égale à la tension $U$                            |
| $a_{u1}$ | Facteur par lequel la tension de référence $U_{ref}$ doit être réduite pour être égale à la tension $U_1$                          |
| $a_{11}$ | Facteur par lequel la tension de référence $U_{ref}$ doit être réduite pour conduire un courant $I_1$ dans l'impédance $R_0$       |
| $c$      | Vitesse du son dans un milieu (généralement de l'eau)                                                                              |
| $d$      | Distance entre <b>hydrophone</b> et réflecteur                                                                                     |
| $d_1$    | Distance entre transducteur auxiliaire et réflecteur                                                                               |
| $G_1$    | Facteur de correction pour la perte par diffraction avec seulement le transducteur auxiliaire                                      |
| $G_2$    | Facteur de correction pour la perte par diffraction avec le transducteur auxiliaire et l' <b>hydrophone</b>                        |
| $G_c$    | Facteur de correction combinant $G_1$ et $G_2$ , applicable uniquement dans certaines conditions de mesure                         |
| $I_1$    | Courant dans le transducteur auxiliaire                                                                                            |
| $I_k$    | Courant dans le court-circuit introduit à la place du transducteur auxiliaire                                                      |
| $J$      | Coefficient de réciprocité                                                                                                         |
| $J_p$    | $\{ = 2 A/\rho c \}$ Coefficient de réciprocité pour les ondes planes                                                              |
| $k_{u1}$ | Correction pour la tension en circuit ouvert du transducteur auxiliaire                                                            |
| $k_u$    | Correction pour la tension en circuit ouvert au niveau d'un <b>hydrophone</b>                                                      |
| $M$      | Sensibilité en champ libre d'un <b>hydrophone</b>                                                                                  |
| $M^*$    | Sensibilité apparente en champ libre d'un <b>hydrophone</b> , supposant des conditions de mesure d'onde plane parfaites            |
| $N$      | Distance du champ proche                                                                                                           |
| $p$      | Pression acoustique                                                                                                                |
| $p_1$    | Pression acoustique dans l'onde plane omise par le transducteur auxiliaire                                                         |
| $R_0$    | Impédance de la charge normalisée égale à l'impédance caractéristique de l'atténuateur de précision                                |
| $R_L$    | Résistance aux fuites en bout de câble de l' <b>hydrophone</b>                                                                     |
| $r$      | Coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau                                                               |
| $s$      | $\{ = (d_1 + d) \lambda/a_1^2 \}$ Distance normalisée entre le transducteur auxiliaire et l' <b>hydrophone</b>                     |
| $S$      | Réponse de transmission au courant d'un projecteur                                                                                 |
| $S_1$    | Réponse de transmission au courant du transducteur auxiliaire                                                                      |
| $S_1^*$  | Réponse apparente de transmission au courant du transducteur auxiliaire, supposant des conditions de mesure d'onde plane parfaites |

|                  |                                                                                               |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U$              | Tension en circuit ouvert au niveau d'un <b>hydrophone</b>                                    |
| $U_1$            | Tension en circuit ouvert pour le transducteur auxiliaire                                     |
| $U_{\text{ref}}$ | Tension de référence                                                                          |
| $v$              | Vitesse de la surface émettrice du transducteur                                               |
| $z$              | Distance le long de l'axe acoustique du transducteur                                          |
| $\alpha$         | Coefficient d'atténuation d'amplitude des ondes planes dans un milieu (généralement de l'eau) |
| $\lambda$        | Longueur d'onde ultrasonore                                                                   |
| $\rho$           | (masse) Densité du liquide de mesure (eau)                                                    |

## K.4 Principe de la méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

### K.4.1 Généralités

Le mode opératoire d'étalonnage recommandé est fondé sur les principes présentés de K.4.2 à K.4.4.

### K.4.2 Réponse de transmission au courant par auto-réciprocité

Un transducteur réciproque plan (paramètres relatifs aux éléments identifiés par le suffixe 1) est en premier lieu étalonné par la méthode d'auto-réciprocité (voir K.9). Sa réponse apparente de transmission au courant supposant des conditions de mesure d'onde plane parfaites,  $S_1^*$ , est déterminée par mesure du courant,  $I_1$ , et de la tension du signal reçu,  $U_1$ , au moyen de la relation suivante (Equation K.20):

$$S_1^* = \frac{p_1}{I_1} = \left( \frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \quad (\text{K.1})$$

et

$$J_p = \frac{2 A_1}{\rho c} \quad (\text{K.2})$$

où:

$p_1$  est la pression acoustique dans l'onde plane émise par le transducteur 1;

$J_p$  est le coefficient de réciprocité pour les ondes planes;

$A_1$  est la surface apparente de la surface du transducteur 1;

$\rho$  est la densité du milieu de propagation (eau);

$c$  est la vitesse du son dans le milieu de propagation.

La pression acoustique dans le champ de l'onde plane transmise par le transducteur 1 est ensuite déterminée en fonction du courant.

### K.4.3 Sensibilité de tension en champ libre par substitution

L'**hydrophone** à étalonner est immergé dans le champ acoustique connu généré par le transducteur 1, et sa tension de sortie en circuit ouvert  $U$  est déterminée. La sensibilité

apparente de tension en champ libre, supposant des conditions de mesure d'onde plane parfaites,  $M^*$ , est ensuite donnée par:

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \left( \frac{I_1 J_p}{U_1} \right)^{1/2} \quad (\text{K.3})$$

#### K.4.4 Correction pour des conditions d'onde non plane

Il n'est généralement pas possible d'établir des conditions de réciprocité d'onde plane (ou sphérique) aux fréquences ultrasonores considérées ici, du fait de la dimension des transducteurs disponibles dans la pratique par rapport aux longueurs d'onde des ondes acoustiques et du fait de l'absorption acoustique relativement élevée dans l'eau à ces fréquences. Dans la pratique, une condition intermédiaire est utilisée avec une tolérance pour les changements dépendant de la fréquence, tels que diffraction et atténuation, ayant une incidence sur l'onde acoustique pendant sa propagation entre le projecteur et le récepteur. Cette tolérance se présente sous la forme d'un facteur de correction,  $k$ , appliqué lors du calcul des résultats d'étalonnage, où  $M = M^*k$ . Le facteur de correction est fondé dans une large mesure sur le modèle théorique de la répartition de la pression dans le champ émis par une source circulaire à piston plane, dans laquelle la vitesse à tout moment est identique en tous points sur la surface émettrice (voir K.11).

NOTE La théorie de la méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs a été spécifiée en détail dans la référence [1] de K.12.

### K.5 Conditions de mesure d'étalonnage

#### K.5.1 Configuration expérimentale générale

La Figure K.1 illustre la configuration expérimentale nécessaire pour cette méthode d'étalonnage et la Figure K.2 montre les circuits électriques associés dans leur forme la plus simple. Le transducteur auxiliaire 1 émet des giclées de tonalité répétitives comprises entre 10 et 20 cycles dans un réservoir d'eau, où elles sont réfléchies par un réflecteur en acier inoxydable épais. Pour l'étalonnage par auto-réciprocité du transducteur auxiliaire, le transducteur est réglé à une position où l'axe du faisceau ultrasonore émis est perpendiculaire à la surface réfléchissante. Pour la deuxième étape concernant l'étalonnage de l'**hydrophone**, le réflecteur est incliné de manière à positionner l'**hydrophone** au centre du champ acoustique réfléchi. Il convient de disposer le transducteur et l'**hydrophone** de sorte que l'angle de réflexion utilisé pour la deuxième étape soit inférieur à 10° afin d'éviter tout écart significatif de la valeur du coefficient de réflexion par rapport à celle pour l'incidence normale.

#### K.5.2 Transducteur auxiliaire

Il convient que le transducteur auxiliaire ait une face active circulaire plane d'un diamètre au moins égal à dix fois la longueur d'onde du son dans l'eau à la fréquence d'utilisation du transducteur. Il convient également qu'il satisfasse aux conditions établies en K.5.4 quant à son aptitude à l'emploi dans le cadre des modes opératoires d'étalonnage par réciprocité. Par ailleurs, il convient de choisir le transducteur en fonction de sa capacité à émettre un champ étroitement conforme à celui prévu en théorie pour une source à piston plane.

NOTE A titre de guide relatif au choix de transducteurs auxiliaires appropriés, il convient que la valeur déterminée de manière expérimentale du rayon efficace,  $a_1$  (voir K.5.3) ne diffère pas du rayon physique vrai de l'élément actif de tout transducteur choisi de plus de +2 % à -5 %.

Bien qu'un seul transducteur auxiliaire puisse fonctionner de manière satisfaisante sur une plage limitée de fréquences, il est en général nécessaire d'utiliser un ensemble de transducteurs pour couvrir toute la largeur de bande d'étalonnage.

### K.5.3 Rayon efficace du transducteur auxiliaire

Le rayon efficace du transducteur auxiliaire,  $a_1$ , correspond au rayon de la source à piston équivalente pour lequel la répartition spatiale de l'amplitude de la pression acoustique dans le champ lointain s'assimile le plus étroitement à celle du transducteur lui-même. Le rayon efficace est déterminé sur la base d'un tracé de l'amplitude de la pression acoustique en fonction de la position le long de l'axe du faisceau, obtenu au moyen d'un **hydrophone** (des informations détaillées sur la méthode expérimentale recommandée de détermination du rayon efficace sont données en K.10.1).

### K.5.4 Vérification de l'aptitude à l'emploi d'un transducteur pour les modes opératoires par réciprocité

Dans la pratique, il suffit de vérifier l'applicabilité de transducteurs particuliers aux modes opératoires d'étalonnage par réciprocité comme suit. Les transducteurs sont vérifiés par paires, l'un étant utilisé comme projecteur et l'autre comme récepteur. Une comparaison est réalisée entre les quotients de la tension de sortie en circuit ouvert du récepteur par le courant d'entrée du projecteur lorsque les fonctions du projecteur et du récepteur sont inversées sans modifier leurs positions. Il convient que ces deux valeurs ne diffèrent pas de plus de 10 %. Si la différence est plus grande, ceci signifie qu'au moins un des transducteurs ne fonctionne pas de manière satisfaisante. La comparaison des deux transducteurs avec un troisième transducteur réversible permet en général de détecter celui qui est défaillant.

NOTE Si les transducteurs sont identiques en termes de construction, ils peuvent être linéaires ou non linéaires dans la même proportion et considérés comme réciproques par les essais spécifiés ci-dessus. Par conséquent, il convient de réaliser ces essais en utilisant plusieurs types différents pour le deuxième transducteur avant de pouvoir supposer le premier comme apte à l'emploi pour les modes opératoires d'étalonnage par réciprocité. Voir référence [2] en K.12.

### K.5.5 Réflecteur

Il convient que le réflecteur soit composé d'un disque en acier inoxydable de diamètre suffisant pour contenir la totalité du faisceau ultrasonore provenant de transducteurs auxiliaires à une distance de sa surface d'au moins 1,5 fois la distance du champ proche, donnée par l'équation  $N_1 = a_1^2 / \lambda$ , où  $a_1$  est le rayon efficace du transducteur, et  $\lambda$  la longueur d'onde acoustique dans l'eau à sa fréquence de fonctionnement. Il convient que l'épaisseur du réflecteur soit telle que la première réflexion provenant de la surface arrière ne gêne pas celle provenant directement de la surface avant pour la giclée de tonalité à la fréquence la plus basse utilisée. Il convient que le réflecteur soit également plat à  $\pm 10 \mu\text{m}$ , avec un état de surface correct à  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

### K.5.6 Trajectoire acoustique

Au cours des modes opératoires d'étalonnage, il convient que la longueur totale de la trajectoire acoustique entre l'arrière du transducteur et le transducteur via le réflecteur ( $2d$  à la Figure K.1), et entre le transducteur et l'**hydrophone** ( $d + d_1$ ), soit comprise entre 1,5 et 3 fois la distance du champ proche  $N_1$  pour le transducteur auxiliaire particulier utilisé.

NOTE Une longueur de trajectoire totale comprise entre  $1,5 N_1$  et  $3 N_1$  s'est révélée être la plus appropriée pour la détermination du facteur de correction (voir K.4.3). L'utilisation de distances de mesure plus grandes, notamment aux fréquences supérieures à 5 MHz, nécessiterait d'appliquer une correction significative aux résultats obtenus pour tenir compte de l'atténuation dans le liquide de propagation, et les mesures réalisées dans les limites de la distance du champ proche font l'objet d'une importante incertitude liée à la structure d'interférence complexe dans le champ acoustique.

### K.5.7 Réservoir d'essai

Il convient que le réservoir d'essai soit suffisamment large pour pouvoir établir la distance entre le transducteur auxiliaire et le réflecteur à une valeur au moins égale à 1,5 fois la distance du champ proche de tout transducteur utilisé. Il convient que les parois du réservoir et la surface de l'eau soient placées à une distance suffisante du transducteur et de l'**hydrophone** pour que le signal issu des réflexions au niveau de ces surfaces soit retardé



par rapport au signal direct principal d'une durée au moins équivalente à celle de la giclée de tonalité à la fréquence la plus basse utilisée. De plus, dans la mesure du possible, il convient que ces surfaces soient revêtues de matériaux neutres du point de vue acoustique tels que caoutchouc ou velours épais, tapis en laine, et réglées à un angle d'au moins 10° par rapport au plan du réflecteur lui-même.

Il convient de remplir le réservoir d'eau nouvellement distillée ou dégazée qu'il convient, du fait de l'absorption continue de l'air de l'atmosphère, de remplacer à des intervalles ne dépassant pas 48 h.

NOTE L'eau peut être dégazée par exposition à une atmosphère de l'air à une pression réduite à moins de 2 000 Pa, ou par chauffage à environ 80°C pendant 1 h (Voir également CEI TR 62781).

### K.5.8 Alignement

Il est nécessaire de placer et d'orienter précisément le transducteur, l'**hydrophone** et le réflecteur. Par ailleurs, il convient de monter ces composants sur des supports stables et rigides permettant un réglage approprié. Il est recommandé d'équiper l'**hydrophone** et le transducteur d'un dispositif de réglage de leurs positions latérales à  $\pm 0,1$  mm, et de leurs orientations de manière indépendante par rapport à leurs centres acoustiques à  $\pm 0,05^\circ$  près ou mieux. Le réflecteur est tenu de pivoter selon un angle d'environ 10° par rapport à un axe parallèle à sa surface et perpendiculaire à la droite joignant les centres acoustiques des **hydrophones** et du transducteur auxiliaire (voir Figure K.1).

### K.6 Méthode expérimentale

Afin d'éviter d'utiliser des compteurs de tension et de courant étalonnés qui ne peuvent généralement pas être appliqués directement pour les mesures des signaux à giclées de tonalité, il est recommandé de mesurer  $I_1$ ,  $U_1$  et  $U$  en termes d'une tension de référence,  $U_{\text{ref}}$ , et d'une résistance connue,  $R_0$ , au moyen d'un atténuateur de précision d'impédance de sortie égale à  $R_0$ . Alors:

$$U_1 = a_{u1} U_{\text{ref}} \quad (\text{K.4})$$

$$U = a_u U_{\text{ref}} \quad (\text{K.5})$$

$$I_1 = \frac{a_{i1} U_{\text{ref}}}{R_0} \quad (\text{K.6})$$

où:

$a_{u1}$ ,  $a_u$  et  $a_{i1}$  sont des constantes de proportionnalité

La substitution de (K.4, K.5 et K.6) en (K.3) donne:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{i1}} \left( \frac{R_0 a_{i1} J_p}{a_{u1}} \right)^{1/2} \quad (\text{K.7})$$

de sorte que la valeur absolue de la sensibilité en champ libre de l'**hydrophone** peut être déterminée sans connaissance de  $U_{\text{ref}}$ , à condition que la valeur de  $U_{\text{ref}}$  reste constante pendant la période de la mesure et que la valeur absolue  $R_0$  soit connue. Il convient que la valeur de  $R_0$  soit connue à  $\pm 1$  % sur la plage de fréquences d'utilisation prévue.

Des informations détaillées sur les procédures expérimentales recommandées pour la détermination de  $a_{u1}$ ,  $a_u$  et  $a_{l1}$  sont données en K.10.2.

## K.7 Calcul des résultats

### K.7.1 Facteur de correction, $k$

Dans le cadre du calcul des résultats des mesures d'étalonnage, on doit tenir compte de toutes différences entre les conditions aux limites parfaites supposées dans la dérivation de l'équation (K.7) et celles utilisées dans la pratique. Comme décrit en K.4.3, ceci peut être réalisé par l'introduction d'un facteur de correction,  $k$ , où la sensibilité vraie en champ libre de l'**hydrophone** est donnée par  $M^*k$ .

Une évaluation complète du facteur de correction est décrite en K.11. Cependant, dans certaines conditions particulières, cohérentes avec les modes opératoires d'étalonnage recommandés dans la présente norme, il est possible de réaliser une simplification significative. Ces conditions sont les suivantes:

- le quotient du diamètre du transducteur auxiliaire par celui de l'**hydrophone** est supérieur à 5, et
- toutes les mesures sont réalisées à des longueurs totales de trajectoire acoustique comprises entre 1,5 et 3 fois la distance du champ proche du transducteur auxiliaire.

En définissant une distance normalisée,  $s$ , comme la longueur de trajectoire acoustique entre le transducteur auxiliaire et l'**hydrophone** divisée par la distance du champ proche, la condition b) peut être synthétisée comme suit:

$$1,5 < \frac{2d_1\lambda}{a_1^2} < 3 \quad (\text{K.8})$$

et

$$1,5 < s < 3 \quad (\text{K.9})$$

où:  $s = (d_1 + d)\lambda / a_1^2$

Dans ces conditions,  $k$  peut être évalué à partir de l'expression suivante:

$$k = G_c \frac{k_{u1}^{1/2}}{k_u} \cdot e^{\alpha' d} \quad (\text{K.10})$$

où:

$G_c$  (une fonction de  $s$  uniquement) permet de procéder aux changements du signal reçu du fait des effets de diffraction pendant la propagation de l'ultrason considérant un faisceau plutôt qu'une onde plane infinie. Ces effets représentent l'écart du système réel par rapport aux conditions d'onde plane supposées dans la dérivation de  $J_p$ , et  $J_p G_c^2$  peut être considéré comme le coefficient de réciprocité pour les conditions intermédiaires utilisées pour toutes les mesures d'étalonnage. La valeur de  $G_c$  en fonction de  $s$  est représentée par le tracé de la Figure K.3.

$\alpha'$  est le coefficient d'atténuation d'amplitude pour les ultrasons dans l'eau dégazée pure et a la valeur suivante:

$$\alpha' = 2,2 \cdot 10^{-14} f^2 \text{Hz}^{-2} \text{m}^{-1} \quad (\text{K.11})$$

à une température de 23°C.

$k_{ui}$  est le facteur par lequel la tension du signal, produite par le transducteur auxiliaire lorsqu'il agit comme un récepteur, doit être multipliée pour obtenir la tension en circuit ouvert équivalente. Si les conditions de charge électrique (par exemple, impédance de sortie du générateur de giclée de tonalité) ne sont pas modifiées entre la transmission et la réception, la valeur de  $k_{ui}$  peut être déterminée en mesurant le courant  $I_k$ , dans le circuit lorsque le transducteur est remplacé par une liaison en court-circuit. On obtient alors clairement:

$$k_{ui} = \frac{I_k}{I_1} \quad (\text{K.12})$$

NOTE Si une porte électrique est fournie pour isoler le générateur du transducteur immédiatement après la transmission de la giclée de tonalité et si un circuit de détection d'impédance élevée est utilisé, la valeur de  $k_{ui}$  peut être prise comme unité.

$k_u$  est le facteur par lequel la tension produite par l'**hydrophone** doit être multipliée pour obtenir la valeur en circuit ouvert équivalente. En général, l'**hydrophone** est étalonné avec la charge électrique à utiliser pendant l'application suivante de l'**hydrophone**, et la correction pour la sensibilité de tension en circuit ouvert se révèle inutile.

Voir références [4] à [10] en K.12.

## K.8 Précision

Le mode opératoire d'étalonnage recommandé et le facteur de correction simplifié fournissent une méthode d'étalonnage des **hydrophones** dans la bande de fréquences 0,5 MHz à 15 MHz avec une incertitude systématique globale inférieure à  $\pm 1,5$  dB au niveau de sensibilité de tension. La technique permet d'obtenir des incertitudes statistiques des mesures qui sont sensiblement inférieures à  $\pm 1,5$  dB.

Voir référence [3] en K.12.

## K.9 Réciprocité d'onde plane

Un transducteur réciproque satisfait à la condition de réciprocité électromécanique:

$$\left| \frac{v}{I} \right| = \left| \frac{U}{F} \right| \quad (\text{K.13})$$

où: (en transmission)  $v$  est la vitesse uniforme de la surface émettrice du transducteur pour un courant d'entrée  $I$  et (en réception)  $U$  est la tension en circuit ouvert produite par une force  $F$  agissant sur le transducteur, supposé dans ce cas être rigide.

A partir des définitions de la réponse de transmission au courant d'un projecteur (voir K.2.5) et de la sensibilité en champ libre d'un **hydrophone** (voir K.2.4):

$$S = \left| \frac{p_{tr}}{I} \right| \text{ et } M = \left| \frac{U}{p_{rec}} \right| \quad (\text{K.14})$$