

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - 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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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

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

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

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

A propos de 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

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

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

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

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 11.040.50

ISBN 978-2-8322-0649-2

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

CONTENTS	2
FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references.....	8
3 Terms, definitions and symbols	9
4 List of symbols.....	15
5 Overview of calibration procedures	17
5.1 Principles	17
5.2 Summary of calibration procedures	18
5.3 Reporting of results	19
5.4 Recommended calibration periods	21
6 Generic requirements of a hydrophone calibration system	21
6.1 Mechanical positioning.....	21
6.1.1 General	21
6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position	21
6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position.....	21
6.2 Temperature measurements and temperature stability	22
6.3 Hydrophone size.....	22
6.4 Measurement vessel and water properties	22
6.5 Measurement of output voltage	23
7 Electrical considerations	23
7.1 Signal type	23
7.2 Earthing.....	23
7.3 Measurement of hydrophone output voltage	24
7.3.1 General	24
7.3.2 Electrical loading by measuring instrument.....	24
7.3.3 Electrical loading by extension cables	24
7.3.4 Noise.....	24
7.3.5 Cross-talk (radio-frequency <i>rf</i> pick-up) and acoustic interference	25
7.3.6 Integral hydrophone pre-amplifiers	25
8 Preparation of hydrophones	25
8.1 General	25
8.2 Wetting.....	25
8.3 Hydrophone support	25
8.4 Influence of cable	26
9 Free field reciprocity calibration	26
9.1 General	26
9.2 Object	26
9.3 General principles.....	26
9.3.1 General	26
9.3.2 Three-transducer reciprocity calibration method	26
9.3.3 Self-reciprocity calibration method	26
9.3.4 Two-transducer reciprocity calibration method	27

9.4	Two-transducer reciprocity calibration method.....	27
9.4.1	Apparatus	27
9.4.2	Procedure.....	27
10	Free field calibration by planar scanning	27
10.1	General	27
10.2	Object	27
10.3	General principle	28
10.4	Procedural requirements.....	29
10.4.1	Hydrophone scanning	29
10.5	Procedure.....	29
10.5.1	Power measurement	29
10.5.2	Transducer mounting	30
10.5.3	Measurement conditions	30
10.5.4	Measurements	30
10.6	Corrections and sources of uncertainty	30
11	Free field calibration by optical interferometry	30
11.1	General	30
11.2	Principle	31
12	Calibration by comparison using a standard hydrophone	31
12.1	General	31
12.2	Object	31
12.3	Principle	31
12.4	Procedural requirements.....	32
12.4.1	Source transducer	32
12.4.2	Source transducer drive signal	32
12.4.3	Measurement system	32
12.5	Procedure.....	32
12.5.1	Measurements (Type I): determination of the directional response of a hydrophone.....	32
12.5.2	Measurements (Type II): calibration by comparison using a standard hydrophone.....	33
12.6	Maximum hydrophone size.....	33
Annex A (informative) Assessment of uncertainty in free field calibration of hydrophones		35
Annex B (informative) Behaviour of PVDF polymer sensors in high intensity ultrasonic fields.....		37
Annex C (informative) Electrical loading corrections		40
Annex D (informative) Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique		41
Annex E (informative) Properties of water.....		49
Annex F (informative) The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry up to 40 MHz		51
Annex G (informative) Waveform concepts.....		61
Annex H (informative) Time delay spectrometry – requirements and a brief review of the technique		71
Annex I (informative) Determination of the phase response of hydrophones		74
Annex J (informative) Maximum size considerations for the active element of a hydrophone		80

Annex K (informative) Two-transducer reciprocity calibration method	82
Bibliography	97
Figure F.1 – Experimental set-up of the interferometric foil technique	54
Figure F.2 – End-of-cable open-circuit sensitivity, M_C , of a coplanar membrane hydrophone	56
Figure F.3 – Hydrophone waveform generated by a 9 μm coplanar membrane hydrophone positioned at the focus of a 5 MHz transducer (focal length 51 mm)	57
Figure F.4 – Interferometer (displacement) waveform generated with the pellicle positioned at the focus of the 5 MHz transducer (focal position 51 mm)	58
Figure F.5 – Frequency spectrum of the displacement waveform (lower curve) and the differentiated displacement waveform (upper curve)	58
Figure F.6 – Sensitivity of a 0,2 mm active element diameter of a 9 μm bilaminar membrane hydrophone determined at 5 MHz intervals over the frequency range 5 MHz to 60 MHz.....	59
Figure G.1 – Coordinates of a field point, P, in the near field of a plane-circular source transducer of radius, a_t	68
Figure I.1 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for two membrane hydrophones	76
Figure I.2 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for a $\varnothing 0,2$ mm needle hydrophone	78
Figure K.1 – Experimental arrangement for the two-transducer reciprocity calibration method	95
Figure K.2 – Block diagram of the electrical circuit for the two-transducer reciprocity calibration method.....	95
Figure K.3 – The value of the term G_C (part of the correction factor k) plotted as a function of the normalized distance.....	96
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)	96
Table 1 – List of typical uncertainty values obtained by the calibration methods specified in this standard and for the frequency range listed here	19
Table E.1 – Speed of sound c [36, 37] and specific acoustic impedance, ρc , as a function of temperature, for propagation in water	49
Table G.1 – Temporal waveform and hydrophone position concepts described in this annex	61
Table I.1 – Example of uncertainties (where a coverage factor, $k = 2$, is used) for a HTDS phase calibration of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm, expressed at a confidence level of 95 %	76

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This consolidated version of IEC 62127-2 consists of the first edition (2007) [documents 87/353/CDV and 87/372/RVC], its amendment 1 (2013) [documents 87/519/FDIS and 87/527/RVD] and its corrigendum of August 2008. It bears the edition number 1.1.

The technical content is therefore identical to the base edition and its amendment and has been prepared for user convenience. A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1. Additions and deletions are displayed in red, with deletions being struck through.

International Standard IEC 62127-2 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics.

IEC 62127-1, IEC 62127-2 and IEC 62127-3 are being published simultaneously. Together these cancel and replace IEC 60866:1987, IEC 61101:1991, IEC 61102:1991, IEC 61220:1993 and IEC 62092:2001.

This bilingual version (2012-06) corresponds to the monolingual English version, published in 2007-08.

The French version of this standard has not been voted upon.

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

A list of all parts of IEC 62127 series, published under the general title *Ultrasonics – Hydrophones*, can be found on the IEC website.

NOTE Words in **bold** in the text are defined in Clause 3.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments 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.

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

INTRODUCTION

The spatial and temporal distribution of acoustic pressure in an ultrasonic field in a liquid medium is commonly determined using miniature ultrasonic **hydrophones**. These devices are not absolute measurement instruments and require calibration. The purpose of this part of IEC 62127 is to specify those calibration methods to be used in determining the response of a **hydrophone** in the ultrasonic range, i.e. above 20 kHz up to a frequency of 40 MHz. The main **hydrophone** application in this context lies in the measurement of ultrasonic fields emitted by medical diagnostic equipment in water. **Hydrophone** behaviour over this wide frequency band is required in order to reliably characterize the acoustic parameters of the applied acoustic field. In particular, the frequency range above 15 MHz is important to fully characterize this equipment, primarily due to the increased appearance of high-frequency components in the ultrasonic signals, caused by ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation. In addition, the number of medical ultrasonic systems that use frequencies above 15 MHz, particularly intra-operative probes, is growing. It has turned out in recent years that the **hydrophone** response below 0,5 MHz is also required to reliably determine the peak-negative (rarefactional) acoustic pressure.

While the term "**hydrophone**" can be used in a wider sense, it is understood here as referring to miniature piezoelectric **hydrophones**. It is this instrument type that is used today in various areas of medical ultrasonics and, in particular, to characterize quantitatively the field structure of medical diagnostic instruments. With regard to other pressure sensor types, such as those based on fibre optics, some of the requirements of this standard are applicable to these as well but others are not. If in the future these other "**hydrophone**" types gain more importance in field measurement practice, their characteristics and calibration will have to be dealt with in a revised version of this standard or in a separate one.

NOTE This standard covers the ultrasonic frequency range, from 20 kHz to an upper frequency of 40 MHz. Standards dealing with **hydrophone** properties (IEC 62127-3) and **hydrophone** use (IEC 62127-1) are being developed in parallel as part of a programme of maintenance activities aimed at restructuring and merging, where possible, all existing ultrasonic **hydrophone** standards. This will eventually lead to unified standards covering the whole field of practical **hydrophone** application.

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz

1 Scope

This part of IEC 62127 specifies:

- absolute **hydrophone** calibration methods;
- relative (comparative) **hydrophone** calibration methods.

Recommendations and references to accepted literature are made for the various relative and absolute calibration methods in the frequency range covered by this standard.

This standard is applicable to

- **hydrophones** used for measurements made in water and in the ultrasonic frequency range up to 40 MHz;

NOTE 1 Although some physiotherapy medical applications of medical ultrasound are developing which operate in the frequency range 40 kHz to 100 kHz, the primary frequency range of diagnostic imaging remains above 2 MHz. It has recently been established that, even in the latter case, the **hydrophone** response at substantially lower frequencies can influence measurements made of key acoustic parameters [1].

- **hydrophones** employing circular piezoelectric sensor elements, designed to measure the pulsed wave and continuous wave ultrasonic fields generated by ultrasonic equipment;

NOTE 2 Some hydrophones can have non-circular active elements, arising from slight deviations from a circular structure caused, for example by electrode structure, or conversely, the active elements can actually be squares. The clauses within this standard remain valid, although, in these cases, special attention should be paid to the directional response and to the effective radii of the active element through various axes of rotation.

- **hydrophones** with or without a hydrophone pre-amplifier.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-801:~~1994~~, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

IEC 60565, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz*

IEC 61161:~~2006~~, *Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*

IEC 61828:~~2006~~, *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~~

IEC 62127-3, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*

3 Terms, definitions and symbols

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 62127-1 and the following apply.

3.1

acoustic centre

point on or near a transducer from which the spherically divergent sound waves emitted by the transducer, and observable at remote points, appear to diverge

3.2

beam axis

straight line that passes through the **beam centrepoints** of two planes perpendicular to the line which connects the point of maximal **pulse-pressure-squared integral** with the centre of the **external transducer aperture**

NOTE 1 The location of the first plane is the location of the plane containing the maximum **pulse-pressure-squared integral** or, alternatively, is one containing a single main lobe which is in the focal Fraunhofer zone. The location of the second plane is as far as is practicable from the first plane and parallel to the first with the same two orthogonal scan lines (x and y axes) used for the first plane.

NOTE 2 In a number of cases, the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced in the above definition by any linearly related quantity, for example

- a) in the case of a continuous wave signal the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced by mean square acoustic pressure as defined in IEC 61689,
- b) in cases where signal synchronisation with the scanframe is not available the term **pulse-pressure-squared integral** may be replaced by **temporal average intensity**.

NOTE 3 See Figure 1 of IEC 62127-1.

NOTE 4 Definition adopted from IEC 62127-1.

3.3

beam centrepoint

position determined by the intersection of two lines passing through the **beamwidth midpoints** of two orthogonal planes, xz and yz

NOTE Definition adopted from IEC 61828:2001.

3.4

beamwidth

W_6 , W_{12} , W_{20}

greatest distance between two points on a specified axis perpendicular to the **beam axis** where the **pulse-pressure-squared integral** falls below its maximum on the specified axis by a specified amount

NOTE 1 In a number of cases, the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced in the above definition by any linearly related quantity, for example

- a) in the case of a continuous wave signal the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced by mean square acoustic pressure as defined in IEC 61689,
- b) in cases where signal synchronisation with the scanframe is not available the term **pulse-pressure-squared integral** may be replaced by **temporal average intensity**.

NOTE 2 Commonly used **beamwidths** are specified at – 6 dB, –12 dB and –20 dB levels below the maximum. The decibel calculation implies taking 10 times the logarithm of the ratios of the integrals.

NOTE 3 **Beamwidth** is expressed in metres (m).

NOTE 4 Definition adopted from IEC 62127-1.

3.5

beamwidth midpoint

linear average of the location of the centres of **beamwidths** in a plane

NOTE 1 The average is taken over 20 beamwidth levels corresponding to intervals in the –0,1 dB to –26 dB range (see IEC 61828, Clause B.2).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 61828:2001.

3.6

beam centre

point in a plane in the **far field**, usually perpendicular to the **beam axis**, at which the **spatial-peak temporal-peak acoustic pressure** occurs

3.7

diametrical beam scan

set of measurements of the hydrophone output voltage made while moving the hydrophone in a straight line passing through a point on the beam axis and in a direction normal to the beam axis

NOTE 1 The **diametrical beam scan** may extend to different distances on either side of the **beam axis**.

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-1.

3.8

directional response

description, generally presented graphically, of the response of a **hydrophone**, as a function of direction of propagation of the incident plane sound wave, in a specified plane through the **reference centre** and at a specified frequency

NOTE Definition adopted from IEC 60565.

3.9

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

a_t

radius of a perfect disc piston-like ultrasonic source transducer that has a predicted axial acoustic pressure distribution approximately equivalent to the observed axial acoustic pressure distribution over an axial distance until at least the last axial maximum has passed

NOTE 1 The **effective radius of a non-focused non-focusing ultrasonic transducer** is expressed in metres (m).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-1.

3.10

effective hydrophone radius

a_h , a_{h3} , a_{h6}

radius of a stiff disc receiver **hydrophone** that has a predicted **directional response** function with an angular width equal to the observed angular width

NOTE 1 The angular width is determined at a specified level below the peak of the **directional response** function. For the specified levels of 3 dB and 6 dB, the radii are denoted by a_{h3} and a_{h6} respectively.

NOTE 2 The **effective hydrophone radius** is expressed in metres (m).

NOTE 3 The radius is usually a function of frequency. For representative experimental data, see [2].

NOTE 4 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.11 electric load impedance

Z_L

complex electric input impedance (consisting of a real and an imaginary part) to which the **hydrophone assembly** output cable is connected or is to be connected

NOTE 1 The **electric load impedance** is expressed in ohms (Ω).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.12 end-of-cable loaded sensitivity end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone (or hydrophone-assembly) $M_L(f)$

ratio of the instantaneous voltage at the end of any integral cable or output connector of a **hydrophone** or **hydrophone-assembly**, when connected to a specified **electric load impedance**, to the **instantaneous acoustic pressure** in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the reference centre of the **hydrophone** if the **hydrophone** were removed

NOTE 1 **End-of-cable loaded sensitivity** is expressed in volts per pascal (V/Pa).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.13 end-of-cable open-circuit sensitivity end-of-cable open-circuit sensitivity of a hydrophone $M_c(f)$

ratio of the instantaneous open-circuit voltage at the end of any integral cable or output connector of a **hydrophone** to the **instantaneous acoustic pressure** in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the **reference centre** of the **hydrophone** if the **hydrophone** were removed

NOTE 1 **End-of-cable open-circuit sensitivity** is expressed in volts per pascal (V/Pa).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.14 external transducer aperture part of the surface of the **ultrasonic transducer** or **ultrasonic transducer element group** assembly that emits ultrasonic radiation into the propagation medium.

NOTE 1 This surface is either directly in contact with the patient or is in contact with a water or liquid path to the patient (see Figure-2 1 of IEC 62127-1).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 61828:2001.

3.15 far field ~~acoustic (sound) field at distances from an **ultrasonic transducer** where the values of the **instantaneous acoustic pressure** and particle velocity are substantially in phase (see also IEC 60050-801, 801-23-30) region of the field where $z > z_T$ aligned along the **beam axis** for planar non-focusing transducers~~

NOTE 1 In the **far field**, the sound pressure appears to be spherically divergent from a point on or near the radiating surface. Hence, the pressure produced by the sound source is approximately inversely proportional to the distance from the source.

NOTE 2 The term "**far field**" is used in this standard only in connection with non-focusing source transducers. For focusing transducers a different terminology for the various parts of the transmitted field applies (see IEC 61828).

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]

3.16

free field

sound field in a homogeneous and isotropic medium in which the effects of boundaries are negligible

NOTE Definition adopted from IEC 60565: 2006, 3.13.

3.17

hydrophone

transducer that produces electric signals in response to waterborne acoustic signals.

NOTE Definition adopted from IEC 60050-801, 801-32-26.

3.18

hydrophone assembly

combination of **hydrophone** and **hydrophone pre-amplifier**

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.19

hydrophone axis

nominal symmetry axis of the **hydrophone** active element

NOTE 1 Unless stated otherwise (explicitly and quantitatively) by the manufacturer, it is understood for the purposes of this standard that this is given by the apparent geometrical symmetry axis of the **hydrophone**.

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.20

hydrophone geometrical radius

geometrical radius of a hydrophone active element

a_g

radius defined by the dimensions of the active element of a **hydrophone**

NOTE 1 The **hydrophone geometrical radius** is expressed in metres (m)

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.21

hydrophone pre-amplifier

active electronic device connected to, or to be connected to, a particular hydrophone and reducing its output impedance

NOTE 1 A **hydrophone pre-amplifier** requires a supply voltage (or supply voltages).

NOTE 2 The **hydrophone pre-amplifier** may have a forward voltage transmission factor of less than one, i.e. it need not necessarily be a voltage amplifier in the strict sense.

NOTE 3 Definition adopted from IEC 62127-3.

3.22

instantaneous acoustic pressure

$p(t)$

pressure minus the ambient pressure at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field (see also IEC 60050-801, 801-21-19)

NOTE 1 **Instantaneous acoustic pressure** is expressed in pascal (Pa).

NOTE 2 Definition adopted from IEC 62127-1.

3.23 instantaneous intensity $I(t)$

acoustic energy transmitted per unit time in the direction of acoustic wave propagation per unit area normal to this direction at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field

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 if it is reasonable to assume far field conditions,~~ 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**, ~~it is~~ can be approximated ~~as~~ by the **derived instantaneous intensity**.

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

where

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

ρ is the density of the medium;

c is the velocity of sound in the medium.

NOTE 2 **Instantaneous intensity** is expressed in watts per square metre ~~squared~~ (W/m^2).

3.24 reference centre

point on or near a **hydrophone** about which its acoustic receiving sensitivity is defined

NOTE Unless stated otherwise (explicitly and quantitatively) by the manufacturer, it is understood for the purposes of this standard that this is given by the geometrical centre of the front surface of the **hydrophone** active element.

(See IEC 60565: 2006, 3.25)

3.25 uncertainty

parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

NOTE See the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [3], 2.2.3.

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**;

ρ 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/m²).

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

3.27 effective wavelength

λ
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 π times the **effective wavelength**, λ ;
- for measurements, the **transition distance** is the equivalent area of the **source aperture width** divided by π times the **effective wavelength**.

NOTE 1 Using method a), an unapodized **ultrasonic transducer** with circular symmetry about the **beam axis**, the equivalent area is πa^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

a_h	effective hydrophone radius (a_{h3} , a_{h6} : with special reference to a 3 dB or 6 dB definition, respectively)
a_g	hydrophone geometrical radius
a_{max}	maximum effective radius for a specific hydrophone application
a_P	lateral distance from the beam axis (a_{PmaxE} , a_{PmaxH} : maximum values with respect to avoiding edge wave and head wave interference, respectively)
a_t	effective radius of a non-focused non-focusing ultrasonic transducer
A_g	geometrical area of an ultrasonic transducer
B/A	Fox-Wallace non-linearity nonlinearity parameter
c	speed of sound in a medium (usually water)
C_H	end-of-cable capacitance of the hydrophone including any integral cable and connector
$D(\theta)$	normalized directional response function
e	base of natural logarithms
f	frequency
f_f	fundamental drive frequency of a signal used to generate non-linear nonlinear distortion
f_u	upper frequency limit of the stated frequency band of a hydrophone
I_p	magnitude of the instantaneous intensity assuming proportionality with acoustic pressure squared
$\vec{I}(x,y,z,t)$	instantaneous intensity vector at the point (x,y,z) at time t
$I(x,y,z,t)$	component of the instantaneous intensity vector in the propagation direction at the point (x,y,z) at time t
F	geometric focal length of a focusing transducer

j_{max}	the number of the farthest scan point in a radial scan
k	circular wave number ($= 2\pi/\lambda$)
L_{SA}	source aperture width
L_{TA}	transducer aperture width
$\underline{M}$	general symbol for the complex hydrophone sensitivity, $M = \underline{M} $ being its modulus and $\arg(\underline{M})$ being its argument (= phase angle)
$M_c(f)$	end-of-cable open-circuit sensitivity
$M_L(f)$	end-of-cable loaded sensitivity
N_{av}	number of waveform averages taken to generate a time-averaged voltage waveform
N	number of diametrical samples
N_{harm}	harmonic number
p_0	pressure amplitude
p_1	acoustic pressure amplitude at the face of a transducer
$p(x,y,z,t)$	instantaneous acoustic pressure at the point (x,y,z) at time t
$P(l)$	total ultrasonic power passing through a plane of infinite extent in an acoustic field at a distance l from an ultrasonic transducer
P_0	total ultrasonic power emitted by a transducer
rf	radio-frequency signals
r	distance from the ultrasonic beam centre to a scan point
R	$(l/\pi a_1^2)$ - normalized distance between a transducer and a hydrophone in terms of the Rayleigh distance $(\pi a_1^2/\lambda)$
R_{1i}, R_{2i}	distances from the beam centre to the extremes of the i th diametrical beam scan
s	distance from the ultrasonic beam centre to the nearest scan point
t_H	arrival time of the nearest head wave
t_{TDS}	time available for a free field measurement in time delay spectrometry
TF	acoustic transmission factor
$U_L(x,y,z,t)$	end-of-cable voltage for a hydrophone with the hydrophone at the reference point (x,y,z) and at time t
$U_L'(x,y,z,t)$	end-of-cable voltage for a hydrophone including noise with the hydrophone at the reference point (x,y,z) and at time t
$U_n(x,y,z)$	root-mean-square (rms) noise level measured with a hydrophone at the reference point (x,y,z)
U_T	voltage at the terminals of an ultrasonic transducer
$\vec{v}(x,y,z,t)$	Instantaneous particle velocity vector at the point (x,y,z) at time t
v_t	speed of a radial wave in a transducer plate
w_f	beamwidth of the fundamental-frequency field component
z	axial distance between a hydrophone and an ultrasonic transducer surface. (z_1, z_2, z_3 and z_4 are special distance values according to certain criteria involving edge waves and head waves)
z_{min}	minimum distance for a finite size hydrophone from a transducer
z_{pf}	distance of the pressure focus from a focusing transducer
z_T	transition distance
Δz	distance difference
$\underline{Z}_h$	complex electric output impedance of a hydrophone
$\underline{Z}_L$	complex electric load impedance
α	amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water)

β	non-linearity nonlinearity parameter in the sense of $\beta = 1 + B/(2A)$
δ	amplitude of the second harmonic expressed as a percentage of the acoustic pressure at the fundamental frequency
δ_{av}	pressure amplitude correction for finite hydrophone size
θ	angle between the ultrasonic propagation direction and the z-axis, equivalent to the angle between the line joining the centre of the ultrasonic transducer and the centre of the hydrophone and the propagation direction
θ_1	angle between the line joining the centre of the ultrasonic transducer to the centre of the hydrophone and the direction of maximum sensitivity of the hydrophone
γ	ratio of beam radius to the effective hydrophone radius
ζ	acoustic displacement as measured by an optical interferometer
θ	angle of incidence of an ultrasonic wave with respect to the hydrophone axis (θ_3 , θ_6 : with special reference to 3 dB and 6 dB defined levels)
λ	ultrasonic wavelength
λ_1	optical wavelength
ξ	$\pi/2$ times the Rayleigh length (a_t^2/λ , see IEC 61828) of a focusing transducer
ρ	(mass) density of the measurement liquid (water)
ρc	specific acoustic impedance
σ	non-linear nonlinear distortion parameter
σ_m	non-linear nonlinear propagation parameter
τ	pulse duration or burst duration (τ_{maxE} , τ_{maxH} : maximum values with respect to avoiding edge wave and head wave interference, respectively)
ω	circular frequency

5 Overview of calibration procedures

5.1 Principles

Hydrophones are required for absolute measurements of the properties of an acoustic field. The time-dependent voltage output from a **hydrophone**, $u(t)$, may be presented in the form:

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad (2)$$

where

$p(t)$ is the pressure waveform;

$*$ is a convolution;

$m(t)$ is the impulse response of the **hydrophone**.

Viewed in the Fourier domain, if $U(f)$, $P(f)$ and $M(f)$ are the respective Fourier transforms, then the resultant voltage spectrum, $U(f)$, is equal to $P(f) \times M(f)$. The quantity $M(f)$ is the **hydrophone** transfer function (sensitivity) and its complex value comprises both real and imaginary components.

In agreement with present measurement practice, **hydrophones** are dealt with in this standard as amplitude (magnitude) sensors and not as phase sensors. However, there is some evidence that phase measurement will become more important in the future, particularly due to the application of deconvolution methods (see IEC 62127-1), which require the complex hydrophone transfer function. If indeed phase measurements become important, this standard will need revision, with more rigorous requirements being necessary for that kind of

measurement. A summary of current capability for (relative) phase measurement is provided in Annex I.

NOTE 1 Accordingly, the **hydrophone** sensitivity is understood as a real quantity (expressing the ratio of amplitudes) throughout this standard.

Procedures for the calibration of **hydrophones** are specified using the following principles:

a) calibration using a standard transducer.

A **hydrophone** can be calibrated by comparison with a standard transducer utilized as a source of ultrasonic power. The output power of the transducer shall be determined using radiation force balance techniques as given in IEC 61161;

b) calibration without using a standard transducer.

This type of calibration covers:

1) reciprocity calibration

A calibration based upon the reciprocity principle, in which at least one transducer is a reciprocal transducer;

2) physical calibration

A calibration in which the sound pressure at the **hydrophone** is calculated from the measurement of a physical parameter related to the acoustic field, such as acoustic displacement. (e.g. optical interferometry).

NOTE 2 “Absolute” **hydrophone** calibration is understood here in the sense of “without reference to another **hydrophone**”. This is sometimes also referred to as “primary” calibration. On the other hand, **hydrophones** are often calibrated in practice following a “secondary” or “substitution” procedure, which means a sensitivity comparison with a calibrated reference **hydrophone**. The reference **hydrophone** itself may have been calibrated in “absolute” terms or against another reference **hydrophone**, and so on. Obviously, there are two different fundamental procedures: to perform an absolute **hydrophone** calibration and to compare the sensitivity of two **hydrophones**. Clauses 9, 10, 11, and Annexes D, F and H deal with the former procedure. The latter procedure is dealt with in detail in Clause 12. It should be noted that a substitution calibration usually involves both steps and that the interested user should refer to both Clause 12 and the other clauses dealing with absolute calibration (and that **uncertainties** from both fundamental steps contribute to the final calibration **uncertainty** in the case of a substitution calibration).

5.2 Summary of calibration procedures

The appropriate frequency ranges of the various methods that can be used to calibrate ultrasonic **hydrophones** are given below, with a reference to the clause that specifies the relevant method. Table 1 provides a tabulation of the typical achievable calibration **uncertainty**.

- | | |
|--|-----------|
| a) Free field reciprocity calibration | Clause 9 |
| – Calibration without a standard transducer in a free field , between 50 kHz and 15 MHz. | |
| b) Free field calibration by planar scanning | Clause 10 |
| – Calibration with a standard transducer in a free field , between 500 kHz and 15 MHz. | |
| c) Free field calibration by optical interferometry | Clause 11 |
| – Physical calibration carried out through a free field measurement of the acoustic displacement, between 200 kHz and 40 MHz. | |

d) Calibration by comparison using a standard hydrophone

Clause 12

- Calibration by comparison with a calibrated standard **hydrophone**, between 50 kHz and 40 MHz.

Table 1 – List of typical uncertainty values obtained by the calibration methods specified in this standard and for the frequency range listed here

Clause	Method	Frequency range	Uncertainty
9	Two-transducer reciprocity calibration (9.3.4)	1 MHz to 2 MHz	6 %
		up to 10 MHz	10 %
		up to 15 MHz	16 %
	Three-transducer reciprocity calibration (9.3.2)	50 kHz to 100 kHz	5 %
		up to 500 kHz	6 %
		up to 1 MHz	10 %
10	Free field calibration by planar scanning (Annex D)	500 kHz to 10 MHz	6 %
		up to 15 MHz	18 %
11	Free field calibration by optical interferometry (Annex F)	200 kHz ^a to 1 MHz	7 %
		up to 10 MHz	7 %
		up to 20 MHz	8 %
		up to 30 MHz	10 %
		up to 40 MHz	11 %
12	Calibration by comparison using a standard hydrophone (12.5.2) (Annex G, Annex H)	50 kHz to 200 kHz	9 %
		up to 1 MHz	8 %
		up to 10 MHz	7 %
		up to 20 MHz	11 %
		up to 30 MHz	12 %
		up to 40 MHz	12 %

^a The lower frequency range of 200 kHz should not be taken as the lower limit to which calibrations may be carried out using optical interferometry. This lower limit is typically controlled by reflections from the water tanks or from the device being calibrated.

5.3 Reporting of results

The end-of-cable sensitivity of the **hydrophone assembly** shall be stated in V/Pa or in decimal submultiples, or as a logarithmic level in dB with reference to a stated sensitivity value. It shall be stated whether the sensitivity value given is the **end-of-cable open-circuit sensitivity** or the **end-of-cable loaded sensitivity**. In the latter case, the relevant electrical loading conditions shall be stated, i.e. the **electric load impedance**, in order to obtain the stated sensitivity.

NOTE 1 "End-of-cable" refers to the end of the output cable of the **hydrophone assembly**, with or without a **hydrophone pre-amplifier**.

The **uncertainty** of the stated sensitivity shall be given. If the sensitivity is given for a frequency interval, then the **uncertainty** shall be given for exactly the same interval. If the sensitivity is given for a number of frequency points, then the **uncertainty** should be given for frequency intervals that are likely to be useful to the user.

NOTE 2 Guidance on the assessment of **uncertainty** can be found in Annex A.

The frequency interval over which the sensitivity is given and over which the **uncertainty** applies shall be stated. For the purposes of this standard, sensitivity and **uncertainty** values may be given separately for several frequency intervals. The frequency response may be given in terms of absolute sensitivity values or in a relative representation, relative with reference to the absolute **hydrophone** sensitivity at a certain frequency. In the case of the relative representation, the reference sensitivity and the frequency to which it applies shall be stated.

The methods by which the sensitivity and its **uncertainty** have been obtained shall be described.

Any calibration is only valid for the environmental conditions existing during the calibration. The environmental conditions pertaining to that calibration shall therefore be stated. These shall include all those conditions that might influence the sensitivity of the test device. Conditions to be reported shall include:

- date of the calibration;
- water temperature and its **uncertainty**;
- whether or not a **hydrophone pre-amplifier** is included in the **hydrophone assembly**, including unique identification information;
- water properties, length of soaking time and any wetting procedure adopted, such as the addition of a wetting agent;

NOTE 3 The sensitivity of single layer, electrically unshielded membrane **hydrophones**, for example is affected by the electrical conductivity of the water used.

NOTE 4 The response of some **hydrophones** can change during immersion in water, and it is important that the calibrations have been completed only following sufficient soaking such that response has stabilized.

- the orientation of the **hydrophone** about any axis or alignment mark presented on its body or casing;
- in situations where the mounting arrangement affects the sensitivity of a **hydrophone**, the details of the mount shall be specified;

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.

- a specification of the characteristics of any additional cables attached to the **hydrophone**, during the calibration;
- the nominal direction of ultrasonic incidence in relation to the **hydrophone**;

NOTE 6 The last point is important, as it has been found in the literature [4] that even with membrane **hydrophones**, the response can change upon reversal of the ultrasonic propagation direction in relation to the **hydrophone**.

- the maximum acoustic pressure experienced by the **hydrophone** during the calibration;

NOTE 7 Annex B describes the linearity of hydrophones manufactured from polyvinylidene fluoride (PVDF) for use in characterizing high amplitude acoustic fields.

- any assumptions made about the device under test (e.g. the position of the **hydrophone reference centre**).

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

5.4 Recommended calibration periods

The recommended calibration period for the **hydrophone** will depend on its characteristics. This interval shall be specified by the manufacturer.

NOTE 1 A calibration period of one year will be appropriate in most cases (see IEC 62127-3).

For reference **hydrophones**, which are used purely for calibration purposes, it is recommended that a calibration is performed annually. Where **hydrophones** are used in the field, calibrations may be required at shorter time intervals.

NOTE 2 It can be useful to check the calibration of a working (or field) **hydrophone** through a “spot check” comparison with a second calibrated (reference) **hydrophone** or a check source, using one of the waveform concepts described in Annex G. In extreme cases, where there are concerns regarding the stability of a working **hydrophone**, this may be undertaken before and after measurements (see **hydrophone** use in IEC 62127-1).

6 Generic requirements of a hydrophone calibration system

6.1 Mechanical positioning

6.1.1 General

Precise positioning and orientation of the transducer, **hydrophone** and reflector (for the reciprocity method specified in Clause 9) is needed and these components should be mounted in stable, rigid supports which allow the appropriate adjustments to be made. It is recommended that the **hydrophone** and transducer are equipped with a means of setting their lateral positions and orientation such that the change in the **hydrophone** output signal is less than 0,1 dB if the mounts controlling either the spatial position or the relative orientation of the **hydrophone** are moved by one incremental step.

6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position

The axial distance of the **hydrophone reference centre** from the transducer shall be known and reproducible to within 0,2 mm.

NOTE 1 In order to derive the calibration **uncertainty**, repeat measurements may be made that can involve the removal and replacement of the **hydrophone** at the same position in the transducer field.

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.

This requirement may need modification in the case of focusing source transducers, dependent on their actual axial field distribution.

NOTE-2 3 For focusing source transducers operating in the frequency range of this standard, positioning is critical. The following is an assessment of the axial distance change from the focal length, i.e. $\Delta z = F - z$, leading to a pressure reduction of 1 dB. Starting from the theoretical equation $\sin[\xi(1/z - 1/F)]/[\xi(1/z - 1/F)] = 0,89$, where $\xi = \pi a^2 f / (2c)$, a two-term sine expansion yields $\Delta z = 0,808 F^2 / \xi$.

NOTE-3 4 In the following example, if a plane ultrasonic wave in the linear amplitude range is propagated at a water temperature of 22 °C, the ultrasonic amplitudes at two axial positions that are 2 mm apart differ by 0,09 dB for a frequency of 15 MHz and by 0,7 dB for a frequency of 40 MHz, as a consequence of the frequency-dependent attenuation (see Annex E).

6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position

The ~~dependence~~ **variation** of the **hydrophone** output voltage should be checked when the lateral **hydrophone** position is ~~varied~~ **changed to ensure that the signal is maximized**. The condition for the lateral hydrophone position is that the output signal shall not be reduced by more than 0,5 dB from the maximum value.

NOTE In the **far field** of a theoretical, plane circular piston source and in the focal plane of a theoretical, focusing transducer under linear propagation conditions, the lateral distance from the field axis is $r = 0,107 \, c \, z / (f \, a_t)$ for a 0,5 dB amplitude reduction and $r = 0,151 \, c \, z / (f \, a_t)$ for a 1 dB amplitude reduction.

6.2 Temperature measurements and temperature stability

The electroacoustic properties of **hydrophones** vary with ambient temperature. For this reason, it is recommended that wherever possible, the **hydrophone** is calibrated under the same conditions of temperature to that under which it will be used. If this is not possible, then corrections to **hydrophone** sensitivity and frequency response values may be applied based on earlier calibrations or validated analytical models. The corrected **hydrophone** sensitivity and response values should have lower **uncertainty** than the uncorrected values.

NOTE Temperature drifts are to be avoided for two reasons:

- a) the amplitude of the ultrasonic wave arriving at the **hydrophone** depends on the temperature, as a consequence of the temperature-dependent ultrasonic attenuation in water (see Annex E);
- b) the time-of-flight of the ultrasonic signal depends on the temperature, as a consequence of the temperature-dependent speed of sound in water (see Annex E). This is of relevance to the adjustment of the time gate for bursts or pulses and also to time delay spectrometry.

With respect to a), the following example can be given. If a plane ultrasonic wave in the linear amplitude range is propagated over 15 cm at a temperature of approximately 22 °C, the resulting ultrasonic amplitude differs for two temperatures that are 1 °C apart by 0,2 dB at a frequency of 15 MHz and by 1,5 dB at a frequency of 40 MHz. (The small-amplitude attenuation coefficient in water is proportional to the square of the frequency. Values as a function of temperature are given in Annex E).

With respect to b), the following recommendation can be made: in a measurement of Type II specified in Clause 12 (comparison of sensitivity of two or more hydrophones), the axial **hydrophone** distance should be adjusted to a constant propagation time.

6.3 Hydrophone size

The active element of a **hydrophone** generates a voltage across its electrodes proportional to the average acoustic pressure over its surface. If full spatial resolution is to be achieved, therefore, the **effective radius of the hydrophone** shall be small compared with the wavelength of the highest frequency component within the acoustic field used for calibration. Furthermore, the actual acoustic pressure on the **hydrophone's** sensitive surface is influenced by diffraction of the **hydrophone** itself [5, 6, 7].

NOTE 1 If the **hydrophone** is carefully designed to have a known or well-defined active surface, it might be possible to remove the effects of spatial averaging and diffraction from the data, at a given frequency, by deconvolution, based on the known dimensions of the active element.

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

The test tank shall be sufficiently large to allow the establishment of free field conditions at the lowest frequency of interest, ~~and also to allow the distance between the transducer, the hydrophone or any reflector (for the reciprocity method specified in Clause 9) to be set at a value equal to at least 1,5 times the near field distance of any of the transducers used.~~ 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.

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 not interfere with the first signal arrival generated by the transducer. Furthermore, where possible, such surfaces should be lined with acoustically absorbent materials.

It is important that the acoustic signal is not contaminated by reflections. The following check is recommended at the beginning of each measurement. In all cases where bursts or pulses are applied, the **hydrophone** output signal should be observed when the transducer–**hydrophone** distance is varied over several millimetres, in order to ensure the absence of multiple transducer–**hydrophone** echoes from the signal received. If such echoes interfere with the signal received, a remedy could be to change the pulse repetition frequency.

The water properties shall be consistent with the specification provided by the hydrophone manufacturer.

NOTE The sensitivity of some hydrophones can be dependent on the electrical conductivity of the water medium. In such cases, care needs to be exercised to ensure that the conditions for the measurement are sufficiently similar to those of the calibration.

6.5 Measurement of output voltage

The signal from the **hydrophone** or **hydrophone pre-amplifier** and any transducer shall be measured with the aid of an oscilloscope, digital signal analyzer, spectrum analyzer or other appropriate instrument with sufficient bandwidth and sensitivity. Additional amplification of the signal from the **hydrophone** or **hydrophone pre-amplifier** may also be necessary in order to achieve acceptable signal-to-noise.

The instrument to which the **hydrophone** or **integral amplifier** is connected (e.g. oscilloscope, digital signal analyzer, spectrum analyzer, amplifier) shall meet the following requirements:

- its complex input impedance over the relevant frequency range of interest shall be known so that the **end-of-cable loaded sensitivity** can be determined (see Annex C);
- its linearity with the input signal over a dynamic range of 50 dB shall be better than $\pm 0,3$ dB;
- in the case of a digital signal analyzer: for recording temporal waveforms, the sampling rate shall be at least $20f$ megasamples/second, where f is in MHz. Also, the gain shall be adjusted to allow at least seven significant bits in the digitized waveform.

NOTE For the 40 MHz upper frequency limit specified in this standard, this will require a sampling rate of at least 800 MHz.

7 Electrical considerations

7.1 Signal type

The signal used for the calibration may be either sinusoidal (continuous wave), swept sinusoidal [8] or pulsed sine wave (gated tone-burst). A sufficient number of frequencies shall be chosen to ensure that the **hydrophone** performance is well-characterized over the desired frequency range.

NOTE The various possible waveform concepts that can be used to obtain **hydrophone** calibration information over the frequency range of interest are summarized in Annex G.

7.2 Earthing

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

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 Measurement of hydrophone output voltage

7.3.1 General

The open-circuit voltage of the **hydrophone** shall be determined at the end of the **hydrophone** cable.

For a continuous wave signal, the measurement may be done using a high impedance voltmeter. However, for tone-burst signals, it is best accomplished by digitizing the **hydrophone** voltage waveform, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter. Where an amplifier, attenuator or filter are used in combination with the voltmeter or digitizer to form a measuring channel, these elements will generally also require calibration.

NOTE Continuous wave signals relevant to **hydrophone** calibration techniques are described in Annex H. Amplitude modulated waveform concepts are described in Annex G.

7.3.2 Electrical loading by measuring instrument

During the measurements, the **hydrophone** shall be connected to a high input impedance measuring instrument (amplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer). Where the impedance of the **hydrophone** is high (for example for a small piezoelectric **hydrophone** of low capacitance), consideration shall be given to the electrical loading of the **hydrophone** by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage. The corrections may be calculated using the procedure given in Annex C. If the same electrical load is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, then corrections may be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

NOTE 1 If, in a practical application, the **hydrophone** is used with subsequent electronic components such as amplifier, oscilloscope, etc., the frequency response of the whole system is, of course, influenced also by the frequency response of these additional components.

NOTE 2 Attention should be paid to the appropriateness of the output impedance of the hydrophone/amplifier in relation to the input impedance of the connected measuring instrument.

7.3.3 Electrical loading by extension cables

If an extension cable is attached to the **hydrophone**, this cable will electrically load the **hydrophone** and corrections shall be applied to obtain the open-circuit end-of-cable **hydrophone** voltage. Where the cable and **hydrophone** appear electrically to be purely capacitances (this is generally true for a cable and is true for a **hydrophone** in the frequency range well below resonance), a correction may be derived from the capacitances of the **hydrophone** and cable. Where the impedance of the hydrophone is not purely capacitive (for example at frequencies close to resonance), the complex impedance shall be used to calculate the loading correction. Guidance on both the above cases is given in Annex C. If the same extension cable is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, the corrections may be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

NOTE To reduce the impact of electrical loading, some **hydrophones** are provided with a **hydrophone pre-amplifier** that is typically mounted as close to the **hydrophone** as possible (see 7.3.6). This is particularly important, at high frequencies, as a means of reducing the effect of cable resonances.

7.3.4 Noise

The level of electrical noise can degrade the accuracy with which electrical measurements can be made. The signal-to-noise ratio shall be sufficient such that measurements may be made without significant loss of accuracy. It is preferable that the signal amplitude be at least 20 dB greater than the noise level.

NOTE 1 The level of broadband interfering noise can be reduced by the use of a band-pass filter with a bandwidth sufficiently wide to allow the signal to pass through without distortion.

NOTE 2 In the presence of electrical noise, the signal-to-noise ratio might be improved by the averaging of repeated signals. For random noise, averaging N_{av} signals will improve the signal-to-noise ratio by a factor of the square root of N_{av} .

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

In the presence of interference and cross-talk, signal-averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement. Efforts should be made to determine the cause of the problem and steps taken to minimize the effects. The acoustic interference level shall be at least 30 dB lower than the signal level.

Where cross-talk is present with tone-burst signals, care should be taken if the length of the burst is greater than the acoustic propagation delay.

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.

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

NOTE 2 The level of *rf* pick-up or cross-talk can be estimated by placing an extremely acoustically attenuating (but thin) layer of material (such as expanded polystyrene) directly between the transducer and the **hydrophone**. This will completely extinguish the acoustic signal, leaving the signal due to the pick-up.

7.3.6 Integral **hydrophone pre-amplifiers**

Where a **hydrophone** has an integral **hydrophone pre-amplifier**, the sensitivity may be expressed as end-of-cable sensitivity (including the performance of the **hydrophone pre-amplifier**). Where a hydrophone has an integral **hydrophone pre-amplifier**, corrections for electrical loading by extension cables or measuring instruments are unnecessary.

8 Preparation of hydrophones

8.1 General

Prior to the actual calibration procedure, careful preparation of the **hydrophones** is necessary, as outlined in the following subclauses.

8.2 Wetting

~~To make sure that the hydrophone is wetted properly by the water without trapping an air film or bubbles on its surface, a wetting agent may be applied to the whole transducer surface. No dry patches should be visible on the hydrophone when it is immersed and then removed from the water.~~ 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.

8.3 Hydrophone support

The ideal supporting mount for a **hydrophone** shall cause minimal influence on the measured sensitivity. However, some **hydrophones** are more susceptible than others to the influence of the method of mounting.

In situations where the mount does have an effect, the **hydrophone** should be calibrated in the same mount that will be used for measurements made with the **hydrophone** in the field. If the mount influences the measured sensitivity, then the calibration is only valid for the type of mount used. Where the **hydrophone** is sensitive to the type of support/mount, a description of the mounting arrangement should be stated with the results.

8.4 Influence of cable

If the cable to the **hydrophone** needs to be lengthened for the purposes of the calibration, the electrical impedance of the extension cable shall be measured separately in order to calculate the influence of electrical loading. A description of how to account for the influence of electrical loading is given in Annex C.

9 Free field reciprocity calibration

9.1 General

This clause specifies the primary calibration of **hydrophones** in a virtually unlimited volume of water, i.e. under **free field** conditions using the principle of reciprocity.

9.2 Object

The object of this clause is to specify various methods of absolute calibration of laboratory standard **hydrophones** with the smallest obtainable **uncertainty**. These methods cover the frequency range between 50 kHz and 15 MHz.

9.3 General principles

9.3.1 General

For a linear, passive, reversible electroacoustic transducer, a well-defined relationship exists between its free field sensitivity as a detector and its transmitting response to current. This relationship is expressed for a particular arrangement of the components within a system of transducers in the definition of the reciprocity coefficient.

All calibrations based on the principle of reciprocity require the use of a reciprocal transducer as both a transmitter and a receiver. Provided changes occurring within the acoustic field between transmission and reception are known, then the transmitting response and the receiving sensitivity of the transducer can be determined directly by measuring the drive current and received signal voltage. One obvious advantage of this method is that the required acoustic parameters are determined by the measurement of electrical quantities only. In practice, calibrations based on the principle of reciprocity can take several forms, briefly specified below.

9.3.2 Three-transducer reciprocity calibration method

A procedure commonly used for applications in marine acoustics involves the use of three transducers (see IEC 60565:2006).

This method can be difficult to implement at higher frequencies, however, because of the need for greater accuracy in the adjustment of transducer position and orientation, and because of the complex nature of the directional response characteristics of transducers used at frequencies of a few MHz. Consequently, this method is recommended for calibrations in the frequency range 50 kHz to 1 MHz.

9.3.3 Self-reciprocity calibration method

Calibration by self-reciprocity, which involves the use of only the test transducer and a reflector, requires a minimum of geometrical adjustment to be carried out. This technique is not, however, generally applicable to high-frequency **hydrophones** which, because of their size, have insufficient acoustic output for an adequate signal-to-noise ratio in the received signal (the minimum diameter for a practical transducer is about 2 mm).

9.3.4 Two-transducer reciprocity calibration method

For the frequency range 1 MHz to 15 MHz, standard **hydrophones** can be calibrated by the two-transducer method in which the **hydrophone** is placed within the known field generated by an auxiliary transducer; a field which has previously been quantified by self-reciprocity procedures. The technique is capable of providing calibration data of an accuracy consistent with performance specifications laid down for the standard **hydrophone**, but does not involve such critical adjustment of component positions and orientations as the three-transducer method.

9.4 Two-transducer reciprocity calibration method

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

9.4.1 Apparatus

The reflector should comprise a stainless steel disc 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 $N_1 = a_t^2 / \lambda$ where a_t is the effective radius of the ultrasonic transducer, and λ the ultrasonic wavelength in water at its frequency of operation.

The thickness of the reflector shall be such that the first reflection from the rear surface will not interfere with that directly from the front surface for the lowest frequency tone-burst to be used. The reflector shall also be flat to $\pm 10 \mu\text{m}$, with a surface finish good to $\pm 5 \mu\text{m}$.

9.4.2 Procedure

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. ~~In the configuration, the auxiliary transducer is calibrated and then the reflector is removed to calibrate the hydrophone.~~ This can avoid the error caused by rotation of the reflector and make the alignment of the **hydrophone** and auxiliary ~~reflector~~ transducer easier, and the error can be reduced to about 0,5 dB.

10 Free field calibration by planar scanning

10.1 General

This clause specifies the calibration of **hydrophones** using the planar scanning method.

10.2 Object

The object of this clause is to specify the planar scanning method of calibrating a **hydrophone**. This utilizes a reference transducer whose output power is known. This transducer or source can be a standard device of known and reproducible output power, characterized traceable to national standards, or it may be calibrated prior to the planar scanning calibration, using, for example a radiation force balance in accordance with IEC 61161. The method covers the frequency range between 500 kHz and 15 MHz, although it can be applied at higher frequencies, with degraded uncertainties.

10.3 General principle

If M_L is the **end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone** whose **reference centre** is at coordinate position (x,y,z) , the **instantaneous acoustic pressure** $p(x,y,z,t)$ is related to the measured end-of-cable voltage $U_L(x,y,z,t)$ by

$$p(x,y,z,t) = U_L(x,y,z,t)/M_L \quad (3)$$

where

(x,y,z) are the coordinates of any point in the field; and

t is any instant in time.

Here, $p(x,y,z,t)$ relates to the acoustic pressure in a plane wave at the **hydrophone reference centre** if the **hydrophone** were removed.

The **instantaneous intensity** vector, $\vec{I}(x,y,z,t)$, at a reference point in an ultrasonic field from a transducer whose centre is at the origin of the coordinate system is given by

$$\vec{I}(x,y,z,t) = p(x,y,z,t) \cdot \vec{v}(x,y,z,t) \quad (4)$$

where

$\vec{v}(x,y,z,t)$ is the instantaneous particle velocity vector at the reference point.

The components of $\vec{I}$ and $\vec{v}$ in the propagation direction will be considered, thereby restricting them to the scalar quantities I and v .

For progressive wave propagation under certain conditions ($a_t/l \leq 0,5$), where l is the axial distance from the transducer, the **instantaneous intensity** can be given [9] by

$$I(x,y,z,t) = [p(x,y,z,t)]^2 / (\rho c) \quad (5)$$

where

ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water); and

c is the speed of sound in water.

(See Annex E for the temperature dependence of ρ and c for water, the recommended transmission medium used for power measurements.)

The total ultrasonic power $P(l)$ transmitted through a plane at $z = l$ perpendicular to the z -axis is given by

$$P(l) = \iint \overline{I(x,y,l,t)} \cos \theta \, dy \, dx \quad (6)$$

where

$dy \, dx$ is an elemental area in the plane $z = l$;

θ is the angle between the z -axis and the propagation direction, the integral denotes integration over the entire plane.

NOTE 1 At the distances l considered in this standard (greater than a_t^2/λ where a_t is the effective radius of the ultrasonic transducer), θ can be considered to be the angle between the z -axis and the line joining the centre of the transducer to the centre of the **hydrophone**.

The bar in equation (6) indicates the time-averaged value defined for any quantity g by

$$\bar{g} = \lim(T \rightarrow \infty) \left[\left(\frac{1}{2T} \right) \int_{-T}^T g(t) dt \right] \quad (7)$$

Taking the time-average of equation (5)

$$\overline{l(x,y,z,t)} = \overline{p(x,y,z,t)^2 / (\rho c)} \quad (8)$$

and from equation (3)

$$\overline{l(x,y,z,t)} = \overline{U_L(x,y,z,t)^2 / (M_L^2 \rho c)} \quad (9)$$

where

$U_L(x,y,z,t)$ the end-of-cable voltage for a **hydrophone** with the hydrophone at reference point (x,y,z) and at time t .

Here, it is assumed that the time-averaged value of the square of the end-of-cable voltage is derived. From equation (5), on the plane $z = l$ and neglecting the $\cos(\theta)$ term (see D.3.9), the **end-of-cable loaded sensitivity**, M_L , is given by

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint \left[\overline{U_L(x,y,l,t)^2} \right] dy dx \right\}^{1/2} \quad (10)$$

The **end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone** can, therefore, be determined by scanning the hydrophone over a plane in the ultrasonic beam, and dividing the integral of the average value of the square of the **hydrophone** signal by the total power in the beam.

NOTE 2 The **end-of-cable open-circuit sensitivity**, M_c , may be determined through a knowledge of the electrical impedances of the **hydrophone** and amplifier determined in the way described in Annex C.

10.4 Procedural requirements

10.4.1 Hydrophone scanning

There are several ways of scanning the **hydrophone** over the plane $z = l$ in the ultrasonic beam. The most comprehensive is to obtain a rectangular array of sample points by moving the **hydrophone** in a two-dimensional raster scan. An alternative scanning procedure is possible if the beam profile from the transducer can be assumed to be approximately cylindrically symmetrical. In this case, a number of **diametrical beam scans** may be performed. These scans should pass through the ultrasonic **beam centre** and be spaced at equal angular increments. For example, if two scans are performed, they should be at 90° to each other. Guidance on the choice of scan types can be found in Annex D.

10.5 Procedure

10.5.1 Power measurement

Use a transducer with a plane disc active element of known total output power at a particular frequency f . The transducer may be a standard transducer [10], in which case the output power shall be known in terms of the particular drive voltage.

Alternatively, determine the output power using the radiation force method as specified in IEC 61161 [11].

Whichever method is used, determine the total ultrasonic power emitted by a transducer, P_0 , at the frequency f under continuous sinusoidal electrical excitation either at a particular drive voltage U_T or over a range of different applied voltages. These measurements provide a value for the output power divided by the square of the voltage (see IEC 61161).

10.5.2 Transducer mounting

Mount the transducer in a beam scanning tank and align it so that the transducer **beam axis** is parallel to the z-axis of the scanning system. Mount the **hydrophone** to be calibrated in the scanning tank and align it following the procedure specified in IEC 62127-1. At the end of this alignment procedure, the z-axis of the scanning system shall be parallel to both the **beam axis** of the transducer and to the direction of maximum sensitivity of the **hydrophone**.

NOTE Typical mounting arrangements commonly utilize the transducer and **hydrophone** mounted in either horizontal or vertical configurations. Whatever arrangement is used, relative alignment of the transducer and **hydrophone** and one of the axes of the scanning system (referred to above as the z-axis) should be maintained.

10.5.3 Measurement conditions

Drive the transducer using a gated sinusoidal excitation (tone-burst) containing a sufficient number of oscillations to ensure steady-state conditions of frequency f either at the particular drive voltage U_T or at a voltage within the range used in the radiation force technique. Position the **hydrophone** at $z = l$ in the far field of the transducer and locate the point of peak acoustic pressure. Choose the distance l carefully, taking account of spatial averaging, directivity and attenuation corrections (see Annex D) and the need for maximum signal-to-noise ratio.

NOTE A value of l in the range from a_t^2/λ to $3a_t^2/\lambda$ is generally satisfactory, where a_t is the **effective radius of a non-focused non-focusing ultrasonic transducer** and λ is the ultrasonic wavelength. The geometrical radius of the transducer may be used instead if the **effective radius of a non-focused non-focusing ultrasonic transducer** (a_t) is not known.

Use continuous wave excitation of the ultrasonic transducer if gating of the excitation is impractical. In this case, take extreme care to avoid reflections from the tank walls and the **hydrophone** and its support, and the formation of standing waves.

10.5.4 Measurements

Measure the amplitude of the output voltage of the **hydrophone** as the **hydrophone** is scanned over the plane $z = l$ perpendicular to the z-axis, either in a raster scan or in a number of **diametrical beam scans**. Measure the end-of-cable voltage $U_L(x, y, l, t)$ at the **hydrophone** as a function of the position of the **hydrophone** in the ultrasonic beam. Determine the extent of the scanned region from considerations of the noise level. Sum the square of the voltage over the area of the ultrasonic beam and derive a value for the **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone** at the frequency f (see Annex D).

10.6 Corrections and sources of uncertainty

Make a final statement of the total **uncertainty** in the determination of the **end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone**. Detailed guidance on assessing these sources of uncertainty can be found in Annex D.

11 Free field calibration by optical interferometry

11.1 General

Currently, the free field calibration of **hydrophones** using optical techniques is restricted to specialized laboratories. Within this standard, information on this calibration technique is presented in Annex F and is provided for information purposes.

11.2 Principle

Typically, such techniques involve applying optics to determine the acoustic displacement produced by a transducer at a position in the acoustic field. These techniques are carried out using a thin membrane or foil positioned within the field, which moves in sympathy with the acoustic displacement. A surface of the foil, which is typically a few microns thick, is metallized to be optically reflecting. Using optical interferometric techniques, the displacement can be determined. In the far field of the transducer, the displacement is simply related to the acoustic pressure, allowing the latter to be determined at a point in the field. A **hydrophone** is calibrated by positioning it at the same location and determining the output voltage. Two realizations of the technique implemented by national standards laboratories can be found in Annex F.

12 Calibration by comparison using a standard hydrophone

12.1 General

In this clause two types of measurement are specified:

- Type I the determination of the **directional response**;
- Type II the comparison of sensitivity of two or more **hydrophones**.

12.2 Object

Both of the above measurements are referred to as "relative" measurements, which means that two or more measurements of the **hydrophone** output voltage under almost identical conditions are performed, with only one relevant parameter being varied, and that ratios of results (or logarithms of ratios of results) are considered.

NOTE As far as Type II is concerned, it is assumed in the following that the sensitivities of two **hydrophones** are being compared. This can easily be extended to three or more **hydrophones**.

12.3 Principle

In type I, the parameter changed is the **hydrophone** orientation angle. The **hydrophone** output voltage at a certain angle is considered in relation to the **hydrophone** output voltage in a reference orientation. In practice, of course, this will be done for a series of angles of rotation. This type of measurement is to obtain the **directional response** and the **effective radius** in accordance with IEC 62127-3.

In type II, the **hydrophone** itself is replaced by another one. It is understood here that one **hydrophone** is a reference **hydrophone** and the other is the **hydrophone** under test. This type of measurement is to obtain the sensitivity of the **hydrophone** under test, if the sensitivity of the reference **hydrophone** is known (from any calibration), and/or the frequency response of the **hydrophone** under test, if the frequency response of the reference **hydrophone** is known (from any calibration).

These relative measurements have the following features in common: they are performed in a water tank and in the ultrasonic field emitted by a transducer to be characterized below. It is vital that measurements carried out in relation to one another are performed as far as possible under identical conditions, meaning at the same position in the field, under the same excitation conditions (waveform and amplitude) and under the same environmental conditions (e.g. temperature), etc. The overall aim is to work under plane wave conditions.

For measurements of Type II, the uncertainty in the calibration is affected by the influence of spatial averaging. Methods of assessing this for various comparison configurations are specified in 12.6.

12.4 Procedural requirements

12.4.1 Source transducer

The ultrasonic source transducer for the measurements specified here shall be a circularly symmetric ultrasonic transducer for use in water. Various concepts exist related to the electrical excitation applied to the transducer, the transducer type and the nature of the acoustical waveform at the position of the hydrophone (linear, ~~non-linearly~~ nonlinearly distorted). These are described in Annex G. Either plane non-focusing transducers for hydrophone position concepts A, B or C or a focusing transducer for hydrophone position concepts D or E may be used. Depending on the waveform concept chosen, it shall be able to produce the necessary amplitude (adequate signal-to-noise in the **hydrophone** signal) at the frequency values of interest. This requirement includes the amplifier driving the transducer. The transducer shall be temporally stable and it shall not lead to a warm-up of the water bath exceeding the acceptable temperature drift limits.

NOTE The following check is recommended at the beginning of each measurement: in all cases where bursts or pulses are applied (temporal waveform concepts a, b, c), the **hydrophone** output signal should be observed when the transducer/**hydrophone** distance is varied over several millimeters, in order to ensure the absence of multiple transducer/ **hydrophone** echos from the signal received. If such echoes interfere with the signal received, a remedy can be to change the pulse repetition frequency.

12.4.2 Source transducer drive signal

The amplitude of the drive signal for the source transducer shall be stable to within ± 1 %; its centre frequency shall be stable to within $\pm 0,1$ %.

12.4.3 Measurement system

The measurement system shall conform to the requirements specified in Clause 6, Clause 7 and Clause 8.

12.5 Procedure

12.5.1 Measurements (Type I): determination of the directional response of a hydrophone

Position the **hydrophone** in the water tank in the field of the source transducer, according to the hydrophone position concept chosen (see Annex G) and with the **hydrophone reference centre** positioned on the transducer **beam axis**. Provide the measurement set-up with a mechanical device enabling the **hydrophone** to be rotated about an axis perpendicular to the **beam axis**, and achieve this independently for two rotation axes perpendicular to each other. The angle of rotation shall be measurable with an angle resolution equal to or better than $\theta_6/10$, where θ_6 is the -6 dB angle, which is known after the measurement or can be roughly inferred prior to the measurement using the **hydrophone geometrical radius**.

The **hydrophone** shall be rotated such that its **reference centre** is kept at the same place in the ultrasound field, in conformity to the positional accuracy requirements of Clause 6.

NOTE 1 For **hydrophones** of the unbacked membrane type, it is possible to check whether the **hydrophone** is actually rotating through its centre by rotating it through 180° and observing any resultant shift in the arrival time of the ultrasonic wave. For needle-type hydrophones, a special jig may need to be arranged, which ensures that the rotation is about the **reference centre**.

The measurement can be conducted in two ways. Either measure the **hydrophone** output voltage as a function of the rotation angle at a constant frequency; or measure the **hydrophone** output voltage as a function of frequency at a constant angle of rotation, and this for several values of the angle of rotation. In the latter case, rearrange the data obtained to yield again the **hydrophone** output voltage as a function of the angle of rotation at a constant frequency. Divide the **hydrophone** output voltage measured by that obtained in the orientation of maximum output voltage.

NOTE 2 To give an indication of the angular resolution required, the following assessment can be made. Assuming a **hydrophone** radius of 0,25 mm and $c = 1\,488$ m/s for water at 22 °C, the following values are obtained from equation (2) in IEC 62127-3: $\theta_6 = 8^\circ$ for a frequency of 15 MHz and $\theta_6 = 3^\circ$ for a frequency of 40 MHz.

NOTE 3 Values for the speed of sound c in water are listed in Annex E.

Use the directional response measurements to define the **effective radius** of the **hydrophone** active element using the two expressions:

$$a_{h3} = 1,62 \, c / (2\pi f \sin \theta_3) \quad (11)$$

and

$$a_{h6} = 2,22 \, c / (2\pi f \sin \theta_6) \quad (12)$$

where

θ_3 and θ_6 are the angles at which the hydrophone signal has decreased by –3 dB and –6 dB respectively.

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-~~of-rotation~~. Further information on the **effective hydrophone radius** may be found in IEC 62127-3.

12.5.2 Measurements (Type II): calibration by comparison using a standard hydrophone

This involves a series of measurements, where the **hydrophones** are placed alternately in the ultrasonic field. The minimum shall be a series of two measurements, one with each **hydrophone**. However, it is recommended that at least the first **hydrophone** be remeasured after the second one (this leading to a total of three measurements), to verify the stability of the applied acoustic field. A series of five or more single measurements would be even better.

In each single measurement, position the **hydrophone** in question in the water tank in the field of the source transducer and at the relevant place according to the hydrophone position concept chosen (see Annex G). Maximize the output signal by lateral and rotational adjustment of the **hydrophone**.

The **reference centre** of the **hydrophone** in question shall be positioned in the ultrasonic field exactly at the relevant place chosen for this measurement series, in conformity to the positional accuracy requirements of Clause 6. Provide the measurement set-up with the mechanical means to make this positioning possible. As an additional, useful procedure, observe the time-of-flight (propagation time) of the ultrasonic burst or pulse as an indicator of the transducer/**hydrophone** distance.

Measure the **hydrophone** output voltage as a function of frequency and consider this in relation to the result obtained with the other **hydrophone**.

If the measurements on the two **hydrophones** are not carried out under the same electrical loading conditions, clearly state this and give the prescriptions for calculating the **hydrophone** sensitivity ratio for the same loading conditions.

12.6 Maximum hydrophone size

In order to avoid measurement errors due to spatial averaging in the measurements specified in 12.5, the **effective radius** shall not exceed a limit $a_{\max}$ that depends on the details of the actual measurement as described in Annex J.

If it is not possible to follow this requirement, a larger **hydrophone** radius may be used in one particular situation, namely in the Type II measurement, if the two **hydrophones** to be compared have the same **effective radius** value within ± 5 %.

If these two requirements are not fulfilled, a theoretical correction may, if possible, be applied to the results obtained, but this shall be clearly stated and explained and a reference for the formulas used shall be given.

Annex A (informative)

Assessment of uncertainty in free field calibration of hydrophones

A.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated uncertainty. In evaluating and expressing the uncertainty in the calibration, the guidance provided by the ISO *Guide to expression of uncertainty in measurement* (ISO GUM) [3] shall be followed. In general, uncertainty components are grouped according to how the values are estimated:

Type A: evaluated by statistical means;

Type B: evaluated by other means.

A.2 Overall (expanded) uncertainty

The overall uncertainty should be obtained from all uncertainty components in the manner described in the ISO GUM [3].

When combining uncertainty components, care should be taken when component values are expressed in decibels. Before combination, the values should ideally be expressed in linear form (e.g. in per cent or in the units of the quantity) and not in decibels. The final value of expanded uncertainty may be expressed either in the units of the quantity, in per cent or converted to decibels as required.

NOTE 1 It should be realized that the use of decibels to express uncertainties may lead to asymmetric distributions (e.g. +1,5 dB is equivalent to +19 %, but –1,5 dB is equivalent to –16 %).

NOTE 2 When each component of uncertainty is small, i.e. less than 1 dB, the overall uncertainty can be calculated using decibels.

A.3 Common sources of uncertainty

The following is a list of common sources of uncertainty in the calibration of hydrophones. This list should not be considered exhaustive, but may be used as a guide when assessing uncertainties for a specific implementation of a calibration method. Depending on the calibration method chosen and its implementation, some (though possibly not all) of these sources will require assessment. For example, the errors from measuring instruments might be minimized by the use of the same measuring channel (amplifier, filter, voltmeter, etc.) for all signals and measuring only amplitude ratios. However, since this might not be the case in all implementations, components for these sources of error have been included in the list.

Sources of uncertainty specific to free field reciprocity calibrations:

- inaccuracy of any assumptions about the acoustic field, for example that the field is a spherical-wave field;
- errors in the measurement of the separation distance;
- errors in the values for acoustic frequency;
- errors in the values for water density.

Sources of uncertainty specific to comparison calibrations:

- errors in the calibration of the reference hydrophone (a major source of error in a comparison calibration);
- short-term instability of any reference transducers used for comparison calibrations (e.g. instability of the output of a transducer used as a reference source in a comparison calibration);
- instability of the reference hydrophone in comparison calibrations (i.e. variation in sensitivity of reference hydrophone since previous absolute calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference hydrophone, which would cause a change in sensitivity for the reference hydrophone (e.g. temperature, soaking, details of hydrophone mounting, etc.);
- inaccuracy of any assumptions about the acoustic field produced by a reference source, for example that the field is a spherical-wave;
- errors in positioning of the hydrophones at the same point within the acoustic field;
- lack of stability in the reference transducer electrical drive conditions, including lack of linearity if it is driven with a signal different to that used in its own absolute calibration;
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference transducer, which would cause a change in sensitivity for the reference transducer (e.g. temperature, length of soaking period, details of mounting).

Sources of uncertainty common to all of the above methods:

- interference from acoustic reflections, leading to a lack of free field conditions;
- lack of acoustic far field conditions;
- the spatial averaging effects of the hydrophones under calibration due to their finite size and the lack of perfect plane wave conditions;
- misalignment, particularly at high frequencies where the hydrophone response can be far from omnidirectional;
- acoustic scattering from the hydrophone mount (or vibrations picked up and conducted by the mount);
- errors in measurement of the received voltage (including the accuracy of the measuring instrumentation – voltmeter, digitizers, etc.);
- inaccuracy of the gains of any amplifiers, filters and digitizers used;
- errors in the measurement of drive current or voltage;
- errors due to the lack of linearity in the measurement system (the use of a calibrated attenuator to equalize the measured signals can significantly reduce this contribution);
- inaccuracy of any electrical signal attenuators used;
- electrical noise including radio frequency pick-up;
- inaccuracy of any electrical loading corrections made to account for loading by extension cables and pre-amplifiers;
- bubbles or air clinging to transducers – this should be minimized by adequate wetting and soaking of transducers;
- environmental conditions, such as water temperature. Corrections need not be included for these if the calibration results specify the conditions and state that the calibration is only valid for the conditions stated.

Annex B (informative)

Behaviour of PVDF polymer sensors in high intensity ultrasonic fields

B.1 General

High intensity ultrasonic fields are commonly used in biomedical ultrasonics and it is now well established that those high amplitude fields lead to ~~non-linear~~ **nonlinear** phenomena including distortion of the waveform and generation of harmonics in the propagation medium [12, 13, 14]. Wideband, calibrated ultrasonic polymer probes of both the membrane and needle type have already proved to be the most suitable **hydrophones** for precise measurements of the ultrasonic fields and basic parameters of the **hydrophones** such as frequency response, **directional response** and voltage sensitivity have been described [15]. However, the information on the linearity of the response of the **hydrophones** is rather limited. Linearity is a topic of particular importance for medical applications; modern diagnostic equipment is capable of generating instantaneous pressure amplitudes on the order of 10 MPa [16]. Such amplitudes are only an order of magnitude lower than those encountered in the focal region of extracorporeal shock wave generators (lithotripters).

In addition, linearity in the pressure response of the **hydrophone** is critical for utilization of ~~non-linear~~ **nonlinear** calibration methods [17].

The tests described below were carried out to determine linearity of ultrasonic **hydrophones** made of PVDF polymer. A partial description of the results discussed was published in [18].

B.2 Theoretical background

The theory of finite amplitude acoustics has many applications in underwater and airborne ultrasound [12]. More recently, the implications of ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation phenomena in the biomedical imaging range of frequencies were pointed out [13, 14].

It is well known that the degree of the wave distortion depends on the distance from the source [12]. This relationship provides a practical criterion to distinguish distortions of the waveform due to the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation phenomena, i.e. ~~non-linearity~~ **nonlinearity** of the underlying differential equations and of the propagation medium (here: water). This same practical criterion enables these afore-mentioned distortions to be separated from distortions of the waveform associated with the ~~non-linear~~ **nonlinear** response of the **hydrophone** to the pressure, or possible ~~non-linear~~ **nonlinear** response of the acoustic transmitter or source to voltage excitation. This was used in the tests described below to ensure that the ~~non-linearity~~ **nonlinearity** observed was not associated with a possible ~~non-linear~~ **nonlinear** electroacoustic transfer function.

B.3 Tests

All measurements described here were carried out in a distilled, degassed water at $21,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$. The experimental set-up employed different ultrasound sources working in the frequency range 2,25 MHz to 10 MHz, and **hydrophones**, including needle-type and membrane-type designs [15, 19]. Additionally, an optoacoustic device capable of producing shock waves was used [20, 21]. While the ultrasound sources were able to generate pressure amplitudes on the order of 5,5 MPa [corresponding to instantaneous (spatial-peak temporal-peak) intensities on the order of 1000 W cm^{-2}], the optoacoustic source generated shock waves having peak compressional amplitudes in excess of 10 MPa.

Both sources and **hydrophones** were carefully aligned using an x-y-z micromanipulator system. The signal detected by the **hydrophone** was fed into a spectrum analyzer and then displayed on its screen to determine the harmonic contents. Concurrently, the signal was also observed on an oscilloscope and photographs of the propagating waveforms, corresponding to different axial source distances, were taken.

Prior to each set of measurements, it was verified that the wave distortion was due to the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation phenomena and was not caused due to ~~non-linear~~ **nonlinear** dependence of an acoustic port (transmitting surface) versus excitation voltage. As mentioned above, the verification utilized the fact that the acoustic wave distortion depends on the distance from the source and involved recording the transmitted pulse at different axial distances. Those measurements were performed using both needle-type and unbacked membrane-type **hydrophones** [15, 19].

Three different methods were used to determine the linearity of the response of the **hydrophones** with increasing acoustic pressure.

In the first procedure, the linearity of the needle-type calibrated **hydrophones** was tested by observing the increase in the output voltage of the 0,6 mm and 1 mm diameter probes with increasing excitation of the source transducers. The maximum peak compressional pressure measured by the **hydrophones** in the focal region of the transducers used was approximately 5 MPa at 3 MHz.

The second procedure involved the measurement of the total acoustic power generated by a given source. Calibrated miniature polymer **hydrophones** of the needle and membrane type were used to scan the field and the total power radiated was calculated [22]. The results of the calculations were then compared to the results of the measurements taken at the same field locations with an acoustic radiation force balance. These measurements were performed in the frequency range 1 MHz to 2 MHz to minimize errors due to spatial averaging effects.

The third procedure involved the use of an optoacoustic converter. Earlier work [23, 24 ,25] on more conventional ultrasonic surgical instruments indicated that such a device should produce a diverging field with pressure amplitudes decreasing according to the (distance)⁻¹ law.

NOTE The terms "(distance)⁻¹ law", or "(distance)⁻¹ behaviour", mean that the pressure amplitude behaves in proportion to the reciprocal distance when the distance from the source to the field point considered is increased.

B.4 Results

The linearity measurements described here were carried out using 30 1 mm diameter and 0,6 mm diameter needle-type **hydrophones** [15], and about 10 membrane-type **hydrophones** [15, 19].

In the first procedure, as mentioned above, the linearity of the needle-type calibrated **hydrophones** was tested by gradually increasing the excitation voltage of the 3 MHz source transducer and measuring the corresponding increase in the output voltage of the 0,6 mm and 1 mm diameter needle-type **hydrophones**. A plot of the excitation voltage versus the **hydrophone** signal indicated a linear relationship.

In the second procedure, calibrated miniature polymer **hydrophones** of the needle and membrane type were used to scan the field and the total power radiated was calculated [22]. The results of the calculations were then compared to the results of the measurements taken at the same field locations with an acoustic radiation force balance. For the same acoustic source (either 1,5 MHz or 2,25 MHz) the discrepancy between the acoustic power as measured by the radiation force balance and that determined by using the planar scanning approach was approximately 22 %.

The third procedure involved measurements taken at the output of an optoacoustic converter. In the frequency range 1 MHz to 10 MHz, the waveforms generated by the acoustic sources observed exhibited a shape characteristic for ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation phenomena associated with ~~non-linear~~ **nonlinear** properties of the propagation medium. The optoacoustic devices produced waveforms similar to those encountered in the focal region of the commercially available lithotripters. The $(\text{distance})^{-1}$ behaviour of the devices was experimentally confirmed – the maximum pressure amplitude measured was in the order of 10 MPa and the deviation from $(\text{distance})^{-1}$ characteristics was within the experimental **uncertainty** (15 %) [21].

Any discrepancy from the $(\text{distance})^{-1}$ law exceeding the overall **uncertainty** of the measurements would imply a possibility of ~~non-linearity~~ **nonlinearity** in the **hydrophone's** response. However, no such discrepancy was observed with both membrane- and needle-type **hydrophones** [21].

B.5 Conclusions

The linearity of the pressure response for a number of PVDF polymer **hydrophones** was determined. Measurements were performed at the pressure amplitude levels on the order of 10 MPa. Different test procedures were employed and the results obtained using acoustic transducers indicated that the ~~non-linearities~~ **nonlinearities** observed were clearly associated with the wave propagation only. An excellent agreement between the different designs of **hydrophone**, polymer needle-type and unbacked membrane-type, was obtained.

Furthermore, no discrepancy from the $(\text{distance})^{-1}$ law exceeding the overall **uncertainty** of the measurements was observed with both membrane- and needle-type **hydrophones**. As pointed out above, such discrepancy would imply ~~non-linearity~~ **nonlinearity** of the pressure response with increasing acoustic pressure.

The pressure amplitudes in the tests described above were limited to approximately 10 MPa. Additional evidence supporting the results described above emerges from the testing of the specially designed PVDF **hydrophones** for underwater acoustic applications [26, 27]. Negligible changes, within 0,6 dB, in the frequency response of the **hydrophones** were observed up to hydrostatic pressures of 69 MPa.

Based on the results of these preliminary tests and on the information published in [26, 27], it can be concluded that the polymer **hydrophones** show excellent linearity over a range in intensities typical of those encountered in pulse-echo imaging systems [16].

In addition, the pressure-time waveforms measured in the focal region of the lithotripters do not exhibit any unexpected behaviour. The pressures encountered in the focal region of those lithotripters can be on the order of 100 MPa and the shape of the shock waves measured remained unchanged with decreasing excitation voltage or voltage applied to the electrodes in the electrohydraulic system. While this does not constitute a rigorously obtained proof supporting linear response of the PVDF material, on the other hand, there is currently no evidence to indicate that any ~~non-linearity~~ **nonlinearity** in the pressure response of an appropriately designed ultrasonic PVDF **hydrophone** would exist in the range up to approximately 70 MPa.

Annex C (informative)

Electrical loading corrections

C.1 General

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

C.2 Corrections using complex impedance

Consider the general case in which the hydrophone is considered as a two-terminal network of complex electric output impedance of a hydrophone, $\underline{Z}_h$, connected to a complex electric load impedance $\underline{Z}_L$. The end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone, M_L , when connected to the specified load, is related to the end-of-cable open-circuit sensitivity, M_c , by:

$$M_L = M_c \sqrt{\frac{\operatorname{Re}(\underline{Z}_L)^2 + \operatorname{Im}(\underline{Z}_L)^2}{[\operatorname{Re}(\underline{Z}_L) + \operatorname{Re}(\underline{Z}_H)]^2 + [\operatorname{Im}(\underline{Z}_L) + \operatorname{Im}(\underline{Z}_H)]^2}} \quad (\text{C.1})$$

where $\operatorname{Re}()$ and $\operatorname{Im}()$ denote the real and imaginary parts of the relevant complex impedance. Often, the electrical load can be assumed to be a parallel combination of a resistance, R_L , and capacitance, C_L . In this case, $\operatorname{Re}(\underline{Z}_L)$ and $\operatorname{Im}(\underline{Z}_L)$ are given by

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

and

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

where

ω is the circular frequency.

C.3 Corrections using only capacitances

A further simplification is possible if the impedances of both the **hydrophone** and the load can be assumed to be capacitive. This is often a valid assumption for a **hydrophone** at frequencies much less than the resonance frequency and for loads such as extension cables. In this case, if C_H is the end-of-cable capacitance of the hydrophone including any integral cable and connector, the above equation reduces to

$$M_L = M_c \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (\text{C.4})$$

Annex D (informative)

Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique

D.1 Overview

This annex provides a detailed description of the methodology relating to the calibration of hydrophones using the planar scanning technique. It provides guidance on the options for mechanical scanning of the hydrophone and on evaluating important sources of calibration uncertainty.

D.2 Hydrophone scanning methodology

There are several ways of scanning a **hydrophone** over the plane $z = l$ in the ultrasonic beam. The most comprehensive is to obtain a rectangular array of sample points by moving the **hydrophone** in a two-dimensional raster scan. In this case:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [U_L(x_m, y_n, l, t)]^2 \Delta y \Delta x \quad (D.1)$$

where

M and N are the number of sample points in the y and x directions, respectively; and
 Δx and Δy are the step sizes in the x and y directions respectively.

An alternative scanning procedure is possible if the beam profile from the transducer can be assumed to be approximately cylindrically symmetrical. In this case, a number of **diametrical beam scans** may be performed. These scans should pass through the ultrasonic **beam centre** and be spaced at equal angular increments. For example, if two scans are performed, they should be at 90° to each other. For N **diametrical beam scans** we have:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \left(\frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, s)]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right\} \quad (D.2)$$

where

r is the distance of each scan point from the ultrasonic **beam centre** (equal to $(y^2 + x^2)^{1/2}$ if the **beam centre** is chosen at the origin of the y, x coordinate system);
 Δr is the step size;
 R_{1i} and R_{2i} are the distances from the **beam centre** to the extremes of the i th **diametrical beam scan**;
 s is the distance from the ultrasonic **beam centre** to the nearest scan point.

The second term on the right-hand side of equation (D.2) represents the contribution to the total integral from the ultrasonic **beam centre**.

NOTE Equation (D.2) does not assume that a scan point coincides with the **beam centre** or that scan points are equally spaced from the **beam centre**.

D.3 Corrections and sources of measurement uncertainty

D.3.1 Total power

For the measurements referred to in Clause 10, the **hydrophone** is positioned at a distance $z = l$ from the transducer, in which case a correction to the total ultrasonic output power emitted by the transducer, P_0 , (assumed to be at $z = 0$) shall be made for the attenuation of the water path using the expression:

$$P(l) = P_0 \exp(-2\alpha z) \quad (\text{D.3})$$

where

P_0 is the total ultrasonic output power emitted by a transducer;

$P(l)$ is the total power in the ultrasonic beam at the hydrophone;

α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water).

Annex E provides values for the temperature- and frequency-dependent attenuation for use in equation (D.3).

There are three sources of **uncertainty** in the value for the total power in the ultrasonic beam at the hydrophone $P(l)$ and an estimate should be made of each one. First, there is the systematic uncertainty in the determination of the total output power, P_0 , either from a standard transducer or from a transducer whose output power has been measured using the radiation force measurement technique (see IEC 61161).

The second source of uncertainty is due to possible differences between the total output power from the transducer during the beam scanning procedure and the measured or assumed (for a standard transducer) output power. The magnitude of this uncertainty can be estimated from previous knowledge of the stability of the transducer. This uncertainty should be determined separately for each transducer that is used.

The final source of uncertainty in the determination of total power arises from the correction for the attenuation of water. Uncertainties occur both in the attenuation coefficient α/f^2 , which should be taken as $\pm 1,7\%$ at all temperatures (see [28] and [29]), and also in the determination of the distance, l , between the transducer and the hydrophone. This separation may be determined by measuring the time delay recorded on an oscilloscope between the excitation of the ultrasonic transducer and the reception of the signal at the **hydrophone**.

D.3.2 Received hydrophone signal

The magnitude of the **hydrophone** signal $U_L(x,y,l,t)$ is generally determined using an oscilloscope, digitizer or any other appropriate system, and the uncertainty in the measurement of this signal should be determined. The uncertainty will depend on the harmonic content of the **hydrophone** signal, the frequency response of the hydrophone and the method used to determine the **hydrophone** signal.

It has been shown that planar scanning undertaken on distorted waveforms leads to significant calibration errors [30]. These errors are largest if the peak-positive acoustic peak is used for measuring the **hydrophone** signal and decrease if either the peak-to-peak or peak-rarefactional acoustic pressure is used.

D.3.3 Integration

It is essential to have adequate sampling of the beam in the planar scanning technique. For diametrical beam scans, and assuming cylindrical symmetry, it can be shown using an analysis similar to that in [28] provided that there are at least seven sample points between (and including) the two points 6 dB below the peak of the acoustic pressure beam profile (or five points between the 6 dB points on the pressure squared profile), the uncertainty in the

hydrophone sensitivity arising from the numerical integration is less than $\pm 1\%$. If a raster scanning technique is used, it can be shown that, if both M and N in equation (D.1) are chosen such that both the beam scans passing through the beam centre in the y and x directions contain at least seven sample points between (and including) the two points 6 dB below the peak of the acoustic pressure beam profile, the uncertainty in the hydrophone sensitivity arising from the numerical integration is less than $\pm 1\%$. An assessment shall be made of the uncertainty caused by a finite number of sample points.

In the case of **diametrical beam scans**, the assumption of cylindrical symmetry may be tested by analyzing the data from each radial part of the scan separately in the formula

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}} [U_L(l, r_j)]^2 r_j \Delta r \quad (\text{D.4})$$

where

r_j is the distance from the **beam centre** to the scan point;

$j_{\max}$ is the number of the farthest scan point in a radial scan.

NOTE It is assumed here that each diametrical scan has been decomposed into two radial (or half scans), with the data being analysed separately.

The percentage difference between the maximum and minimum of these values shall be determined and one-half of this value shall be used to determine the uncertainty introduced from the assumption of cylindrical symmetry when **diametrical beam scans** are used.

D.3.4 Directional response

A correction for the directional response of the **hydrophone** shall be made by calculation unless the directional response of the **hydrophone** is not predictable. In the latter case, the procedure shall be to alter the angle of the **hydrophone** to obtain maximum output voltage at each point in the scan. It might not be necessary to optimize the rotation for each scan position, especially if the separation between sample points represents a small change in the angle of incidence of the ultrasound on the **hydrophone**. The procedure based on calculation shall be as follows. First, the directional response of the **hydrophone** should be determined at the frequency, f . Let the normalized directional response function be $D(\theta_1)$, where θ_1 represents the angular orientation. To correct the measurements referred to above, the **hydrophone** signal $U_L(x, y, l, t)$ shall be divided by the factor $D(\theta_1)$, where $\theta_1 = \arctan [(x^2 + y^2)^{1/2}/l]$.

Methods of determining the directional response of **hydrophones** are specified in 12.5.

D.3.5 Finite size of the hydrophone

An estimate shall be made for the uncertainty caused by the finite size of the active element of the **hydrophone**. A **hydrophone** responds to the integral of the acoustic pressure over its active element, and therefore a correction for spatial averaging may be necessary [5, 7, 31, 32, 2]. An estimate of the magnitude of this correction shall be obtained by calculating the difference between the acoustic pressure at a point in the field and the pressure averaged over the **hydrophone** surface ([2], IEC 62127-1). For the purposes of this calculation, the effective area of the **hydrophone** shall be used to define the extent of the **hydrophone** surface. The effective area can be determined from the **effective radius** of the **hydrophone** active element, which shall be determined using the procedures specified in 12.5 [6]. Contributions to the integrations in the planar scanning process [equation (10)] are largest from the centre of the beam; therefore, it is only necessary to determine the uncertainty and apply a correction for regions near the centre of the ultrasonic beam. It is usually preferable to perform measurements at a distance l from the transducer such that the spatial averaging effect at the centre of the beam is less than 5 %.

D.3.6 Noise

In general, the **hydrophone** is scanned to a distance from the ultrasonic **beam axis**—~~centre~~ until no signal is observed above the noise. To apply a correction to the integral of the square of the **hydrophone** signal to account for the contribution from the noise, the noise level shall first be determined. The noise level shall be determined by repeating the whole scanning process with the transducer turned off and measuring the rms noise level at each point. The rms noise level, $U_n(x,y,l)$, shall be subtracted from the measured signals in the following manner. If the average value of the square of the **hydrophone** signal is

$$\overline{[U_L'(x,y,l,t)]^2} \quad (D.5)$$

then the average value of the **hydrophone** signal after correcting for the contribution from noise is

$$\overline{U_L(x,y,l,t)^2} = \overline{[U_L'(x,y,l,t)]^2} - U_n^2(x,y,l) \quad (D.6)$$

With the **hydrophone** at the distance corresponding to the limit of the planar scanning process, an ultrasonic signal below the noise level might be present. In this case, the magnitude of the contribution from outside the scanning region (that omitted in the integration) shall be determined using a theoretical model of the ultrasonic beam. In the **far field** region of a circular plane piston source, the pressure at a point R is proportional to:

$$2J_1(ka_t \sin \theta) / (ka_t \sin \theta) \quad (D.7)$$

where

k is the circular wave number;

a_t is the effective or geometrical radius of the ultrasonic transducer;

θ is the angle between the line connecting the point R to the centre of the transducer and the **beam axis**, see also Clause 4;

J_1 is a Bessel function of the first kind of first order.

This model assumes a spherical scan and hence the contribution omitted shall be determined by integration of this theoretical distribution (squared) over a spherical region defined from the edge of the planar scanning region and compared with the total integral over a hemisphere. The contribution to the integral from outside the scanning region in the planar scanning procedure shall be assumed to be the same as that obtained from the spherical scan model. This contribution shall be used as a correction to the integration, and an uncertainty equal to the correction shall be assigned. This uncertainty is usually small compared to other components.

It might be preferable to scan out to a certain threshold below the peak signal at the centre of the ultrasonic beam, for example 10 % [26] or 5 % [33]. In this case, the contribution from outside the scanning region will be significant and a correction factor shall be determined by using the same procedure as given above.

NOTE 1 The geometrical radius of the ultrasonic transducer may be used instead of the effective radius if the latter is not known.

NOTE 2 The significance of the contribution due to noise to the integration depends on the method of measurement of the **hydrophone** signal.

D.3.7 ~~Non-linear~~ Nonlinear propagation

The planar scanning technique determines the sensitivity of a **hydrophone** at a particular frequency f . It is important that the ultrasonic wave used is not distorted by the introduction of high frequency components due to ~~non-linear~~ nonlinear propagation. For the purpose of

estimating the significance of ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation to the planar scanning calibration method, two procedures are given here, the choice depending on the particular measurement procedures and on the **hydrophone** being calibrated. Essentially, both assume that the uncertainty introduced by ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion depends on the loss in amplitude of the fundamental frequency component in the acoustic pressure waveform. The first procedure assumes that the amplitude of the second harmonic is a certain percentage, δ , of the fundamental amplitude. In this case, the percentage error in the determination of the **hydrophone** sensitivity for $\delta < 30\%$ is (see D.4.5)

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100} \quad (\text{D.8})$$

Although a simple procedure, it might not be possible to determine δ reliably owing to variation in hydrophone sensitivity between the fundamental and second harmonic frequencies or, at high frequencies, because the acoustical attenuation in water has not been taken into account.

The second procedure assumes that the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation can be predicted in the case of a plane piston ultrasonic transducer. As shown in D.4.5, for the **far field** of a transducer emitting a total ultrasonic power P_0 under continuous wave conditions, the error in the determination of the **hydrophone** sensitivity is approximately:

$$P_0 (0,28 R + 0,065) f^4 a_t^2 10^{-20} \quad (\text{D.9})$$

with

$$R = l\lambda/\pi a_t^2 \quad (\text{D.10})$$

where

f is the frequency in hertz; and

a_t is the effective radius of the ultrasonic transducer in metres.

This relationship is accurate if the error is less than 5 % and again attenuation is neglected (see Annex E).

The above estimates are based on the assumption that the signal at the second harmonic frequency is not detected and that the effect of attenuation on nonlinear propagation is small. If a **hydrophone** with a flat frequency response is used then this analysis will overestimate for the error.

An uncertainty estimate shall be made using the relationship given above and these shall be used as an upper limit to the error caused by distortion of the waveform of the **hydrophone** signal. The error shall be less than 5 %.

D.3.8 Planar scanning

Strictly, the derivation of equation (10) from equation (6) should refer to an integration over a spherical surface centred at the ultrasonic transducer. The error introduced by using planar scanning at each point in the scan is proportional to $\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$ where θ is the angle

between the ultrasonic **beam axis** and the line joining the centre of the ultrasonic transducer to the **reference centre** of the active element of the **hydrophone**. Providing θ at the edges of the planar scan is less than about 10° , the uncertainty from using a planar scan is negligible [28]. If the angle is larger, an estimate of the uncertainty shall be made.

D.3.9 Intensity proportional to pressure squared

Equation (5) assumes that the **instantaneous intensity** is proportional to the square of the acoustic pressure. An estimate for the difference between the true **instantaneous intensity**, I , and the intensity, I_p , derived from the square of the acoustic pressure on the axis of a circular plane piston ultrasonic transducer, may be made from the following equation [9]:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{1 + \left(\frac{I}{a_t} \right) / \left[1 + \left(\frac{I}{a_t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{D.11})$$

For the measurement distances recommended in 10.5.3 and for the range of transducer diameters normally encountered (6 mm to 25 mm), this ratio differs from unity by less than 1 %. If distances are chosen that are less than those recommended in 10.5.3, equation (D.11) shall be used to estimate the contribution from this source of uncertainty.

D.4 Rationale behind the planar scanning technique for calibrating hydrophones

D.4.1 General

This clause provides an outline of the derivation and justification of some of the conditions and equations used in the planar scanning technique.

D.4.2 Relationship between hydrophone and transducer effective radii

Consider a plane piston transducer of effective radius a_t and a **hydrophone** of effective radius a_h placed at a distance l from the transducer.

The edge wave from the transducer will be incident at an angle at the hydrophone given by

$$\arcsin \left[\frac{a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{D.12})$$

If the hydrophone is assumed to have a directional response given by

$$2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta) \quad (\text{D.13})$$

where k is the circular wave number ($= 2\pi/\lambda$) and θ is the angle of incidence, then the edge waves should be incident at an angle corresponding to less than 1 dB below the peak of the directional response. For the directional response, this requires that $ka_h \sin(\theta) \leq 1$ (i.e. $[2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta)] ka_h \sin(\theta) = 1 \cong 0,88$). Hence, this is equivalent to

$$k a_h \sin(\theta) \leq 1 \quad (\text{D.14})$$

or

$$\frac{k a_h a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \leq 1 \quad (\text{D.15})$$

D.4.3 Justification for $a_t/l \leq 0,5$

It can be shown [9] that the true intensity at an axial distance l from a plane piston source differs from the intensity determined assuming the "pressure squared" relationship by approximately 6 % for $a_t/l = 0,5$. At axial positions closer to the transducer, the "pressure squared" intensity rapidly increases compared with the true intensity. Consequently, the limit of validity of equation (5) for the purposes of this standard is taken as $a_t/l \leq 0,5$.

D.4.4 Derivation of equation (D.2)

Consider the distribution of points $U_L(l, r)$ between R_{1i} and R_{2i} , the distances from the **beam centre** to the extremes of the i th **diametrical beam scan**. Let s be the distance from the ultrasonic **beam centre** to the nearest scan point. Considering each point as contributing to an annulus, the integration of the **diametrical scan** is given by

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} \pi [U_L(l, r)]^2 r \Delta r \quad (D.16)$$

NOTE The summation equations presented within this clause do not follow normal mathematical convention. Here, the limits given indicate the extrema of the summation. In between these extremes, the parameter, r in D.16 takes on discrete values which correspond to the descriptors of the specific scan points.

However, the central point $U_L(l, s)$ does not contribute an annulus centred on the **beam axis** in the same way as all other points. In this case, the contributions from the two semi-circles disposed about the central point should be considered separately. The total contribution from the point $U_L(l, s)$ to the diametrical summation is

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] \quad (D.17)$$

As equation (D.16) already contains a term for the point $U_L(l, s)$, a correction to equation (D.16) should be applied, given by the difference between the true contribution from the centre point and the term included in equation (D.16), i.e.

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] - \pi [U_L(l, s)]^2 s \Delta r \quad (D.18)$$

which reduces to

$$= \pi [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right] \quad (D.19)$$

This is the last term in equation (D.2).

If the point $U_L(l, s)$ corresponds to the centre of the beam, then $s = 0$ and the braces (curly brackets) in equation (D.2) reduce to

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, 0)]^2 \frac{\Delta r^2}{4} \quad (D.20)$$

NOTE As the term within the summation for the point at the centre of the beam is zero [$r = 0$ for $U_L(l, 0)$], the right-hand term corresponds to the contribution from the centre of the beam.

D.4.5 Effect of ~~non-linear~~ nonlinear propagation, D.3.7

The derivation of the equation D.9 dealing with ~~non-linear~~ nonlinear propagation is outlined below.

A useful approximation to the finite amplitude field of a plane piston radiator at distances of the order of, and greater than, the normalized distance, $R = l \lambda / \pi a_t^2$ is to model the beam profile by a Gaussian function.

For small amounts of distortion, the ratio of the amplitude of the fundamental frequency component of the wave on the acoustic axis to the amplitude in the absence of distortion is given by equations (1) and (2) of [34]:

$$1 - \frac{\sigma^2}{8} \quad (D.21)$$

with

$$\sigma = \left(\frac{7 p_1^2 a_t^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left[R + \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (D.22)$$

where p_1 is the acoustic pressure amplitude at the face of the ultrasonic transducer and is related to the total ultrasonic power emitted by a transducer, P_0 , by

$$P_0 = \frac{\pi p_1^2 a_t^2}{4 \rho c} \quad (D.23)$$

The pressure amplitude for off-axis positions and low amplitudes ($\sigma < 0,5$) is obtained by multiplying σ by the directivity function of the transducer [35] and thus, assuming a Gaussian beam profile, the square root of the integral of the square of the acoustic pressure relative to that in the absence of distortion is given by

$$1 - \frac{\sigma^2}{16} = \left\{ \frac{2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1+R^2)} \right) \right] \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1+R^2)} \right) r dr}{2\pi \int \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1+R^2)} \right) r dr} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (D.24)$$

and hence the percentage error in the calibration of a **hydrophone** is given by

$$100 \frac{\sigma^2}{16} = 100 \left(\frac{49 \pi^3 a_1^2 P_0}{\lambda^4 \rho c^3} \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2R} \right) \left(1 + R^2 \right) \left\{ \ln \left[R + \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^2 \quad (D.25)$$

If R is in the range 0,5 to 3, then this formula can be approximated by the formula (D.9).

Annex E (informative)

Properties of water

Table E.1 – Speed of sound c [36, 37] and specific acoustic impedance, ρc , as a function of temperature, for propagation in water

Temperature °C	Speed of sound c m s ⁻¹	Specific acoustic impedance ρc x10 ⁶ kg m ⁻² s ⁻¹
15	1 465,9	1,4647
16	1 469,4	1,4679
17	1 472,8	1,4710
18	1 476,1	1,4740
19	1 479,2	1,4769
20	1 482,4	1,4796
21	1 485,4	1,4823
22	1 488,3	1,4850
23	1 491,2	1,4875
24	1 494,0	1,4900
25	1 496,7	1,4923
26	1 499,4	1,4946
27	1 501,9	1,4967
28	1 504,4	1,4988
29	1 506,8	1,5008
30	1 509,2	1,5026
31	1 511,4	1,5044
32	1 513,6	1,5062
33	1 515,8	1,5078
34	1 517,8	1,5094
35	1 519,9	1,5108
36	1 521,8	1,5122
37	1 523,7	1,5136
38	1 525,5	1,5148
39	1 527,2	1,5160
40	1 528,9	1,5171

Attenuation coefficient for propagation in water

The value of α in the megahertz frequency range is proportional to f^2 and shall be taken from the following polynomial fit as a function of temperature, T , in °C (valid in the range 0 °C to 60 °C) [29]:

$$\begin{aligned} \alpha/f^2 &= (5,68524 \times 10^1 - 3,02545 \times 10^0 T \\ &+ 1,17416 \times 10^{-1} T^2 - 2,95430 \times 10^{-3} T^3 \\ &+ 3,96985 \times 10^{-5} T^4 - 2,11091 \times 10^{-7} T^5) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2}\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

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

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

Annex F (informative)

The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry up to 40 MHz

F.1 Overview

This informative annex describes the current status of absolute methods of calibration for ultrasonic **hydrophones** appropriate for frequencies above 15 MHz. The basis of some of the methods that have been used in the past, as well as those currently under evaluation, are briefly described in Clause F.2. These are based on the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation of plane waves and optical interferometry. The latter method in particular is attractive, as calibrations can be made directly traceable to primary standards of length measurement. This annex also describes the progress made in implementing absolute calibration methods based on optical interferometry at two National Standards Laboratories. The fundamental difference between the two implementations, designated I and II in F.2.3.1 and F.2.3.2, lies in the disposition of the acoustic and laser beams. In implementation II, in direct contrast to implementation I, the optical beam traverses the acoustic beam.

NOTE "Absolute" **hydrophone** calibration is understood here in the sense of "without reference to another **hydrophone**". This is sometimes also referred to as "primary" calibration. On the other hand, **hydrophones** are often calibrated in practice following a "secondary" or "substitution" procedure, which means a sensitivity comparison with a calibrated reference **hydrophone**. The reference **hydrophone** itself might have been calibrated in "absolute" terms or against another reference **hydrophone**, and so on. Obviously, there are two different, fundamental procedures: to perform an absolute **hydrophone** calibration and to compare the sensitivity of two **hydrophones**. This annex deals with the former procedure. The latter procedure is dealt with in detail in Clause 12. It should be noted that a substitution calibration usually involves both procedures and the interested user should refer to both Clause 12 and this annex (and that **uncertainties** from both fundamental procedures contribute to the final calibration **uncertainty** in the case of a substitution calibration).

F.2 Present position

F.2.1 Magnonic" or ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation-based method

In the past, work has been undertaken to calibrate **hydrophones** at frequencies as high as 100 MHz using the so-called "magnonic" or "empirical ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation model" method [34, 38, 39, 40, 41, 42]. The method is described in [34]. This utilizes a ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation model for plane waves and exploits the fact that, for a piston transducer of relatively large diameter, suitable time-gating of the acoustic signal can isolate the plane wave component from the edge wave radiated from the piston edge. At high pressure amplitudes, these plane waves undergo finite amplitude distortion, producing an acoustic field rich in harmonics. A theoretical plane wave propagation model is used to predict the distortion of these sound waves, and by comparing the predictions with measurements made close to the face of the transducer (undistorted) and at a known distance further along the axis (distorted and made harmonically rich by ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation), a calibration of the **hydrophone** can be obtained at each harmonic frequency.

Results obtained from this method were promising and agreed well with the theoretical response of two membrane **hydrophones**. It does, however, have some disadvantages. First, it depends crucially on the propagation model used. Secondly, the method depends on the performance of the transducer used to generate the acoustic field. Owing to transducer imperfections, the field produced might deviate significantly from the desired plane waves, leading to significant **uncertainties** in the calibration.

Methods employing a smaller diameter focusing transducer to generate harmonics in a focal plane overcome some of these disadvantages. Measured fields are more reproducible at a known focal length distance where there is a well-defined main beam lobe. The focal gain of the transducer can provide higher pressures full of harmonics in a shorter distance than distances used for the plane wave approach. Suitable focusing transducers with uniform properties are commercially available.

F.2.2 Optical interferometry

In the calibration method based on optical interferometry, the acoustic field produced by a transducer is detected using a thin plastic membrane (known as a pellicle or foil) metallized on one side to be optically reflecting. The pellicle is thin enough to be acoustically transparent and follows the motion of the acoustic wave, its displacement being measured using optical interferometry and the acoustic pressure being derived from the measured displacement. The **hydrophone** to be calibrated is substituted for the pellicle with the acoustic centre of the **hydrophone** positioned at the same point in the acoustic field interrogated by the laser beam. The **hydrophone** is then calibrated by measuring the output voltage corresponding to the known acoustic pressure.

Clearly, an important requirement for a viable calibration method is that the acoustic pressure is sufficient for the **hydrophone** signal to have an acceptable signal-to-noise ratio at the frequency of interest, i.e. up to 40 MHz. However, the optical interferometer actually senses acoustic displacement and this imposes a more severe requirement for an acceptable signal-to-noise ratio. For a plane wave, the acoustic pressure amplitude, p_0 , is given by

$$p_0 = \rho c \omega \zeta \quad (\text{F.1})$$

where

- ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water);
- c is the speed of sound in the medium;
- ω is the circular frequency;
- ζ is the amplitude of the acoustic displacement, with the difference in phase between pressure and displacement being ignored.

Ignoring the difference in phase between pressure and displacement means that for a given acoustic pressure, the displacement amplitude is reciprocally related to the frequency so that high acoustic pressures are required to generate a measurable displacement at frequencies of 40 MHz and above. It should be noted that both implementations of the method described below employ focused transducers in order to effect such an increase in acoustic pressure.

F.2.3 High frequency implementations of optical interferometry

F.2.3.1 Implementation I

F.2.3.1.1 Measurement system

The optical calibration technique is based on measurement of the displacement of a membrane that is positioned at the surface of a liquid containing a transducer (Figure F.1). The generated sound wave is normally incident and displaces the membrane, which is measured using a Michelson interferometer [43, 44, 45, 46]. It contains a laser as a light source and a polarizing beam splitter for dividing and combining the optical field (Figure F.1). In the measuring arm, the light is focused onto the foil, which is coated with an aluminium layer in order to improve the optical reflectivity. The focusing ensures a small spot diameter for a sufficient spatial resolution.

A balanced photodetection scheme with a bandwidth $BW \approx 100$ MHz detects the optical output field. It consists of two photodiodes and a difference transimpedance amplifier, A_v , suppressing amplitude noise and increasing the photocurrent. The transimpedance amplifier is followed by a second amplifier V . It has a high input impedance and can be used as a **hydrophone** amplifier (see below). The interferometer is path-stabilized [44] by a servo-loop with a unity-gain frequency of about 100 Hz. In this case, the displacement is obtained from the measured photocurrents by

$$\zeta = \frac{U_S \lambda_I}{2\pi TF \hat{U}} \frac{V(f=0)}{V(f)} \quad (\text{F.2})$$

where

- λ_I is the optical wavelength (the wavelength of the light in vacuum;)
- TF is the acoustic transmission factor of the displacement through the foil;
- U_S is the voltage of the signal;
- $\hat{U}$ is the peak-to-peak voltage of a complete interferometer fringe measured at the output of the amplifier V , which has the frequency-dependent gain $V(f)$.

The output voltage, U_S , is detected by a digital scope, i.e. in the time domain with wide bandwidth ($BW > 100$ MHz). To achieve a sufficiently high signal-to-noise ratio, a focused piezoelectric broadband transducer is used. It is supplied with a burst of a given frequency and the measurement data are acquired immediately after the onset of the ultrasound when the steady state is reached. This avoids disturbances by reflection at the tank walls.

The alignment is carried out using a three-axis translation and a rotation by two axes. The laser spot is adjusted at the focus perpendicular to the beam axis, which is determined by two-dimensional pressure measurements at different distances from the transducer. As alignment criteria, the maximum of the interferometer output and the reflected acoustical signal, and the delay time between the excitation pulse and the output signal, are sufficient for the translation alignment. The angle between the foil and the sound propagation direction is adjusted using the aligned laser beam as a reference.

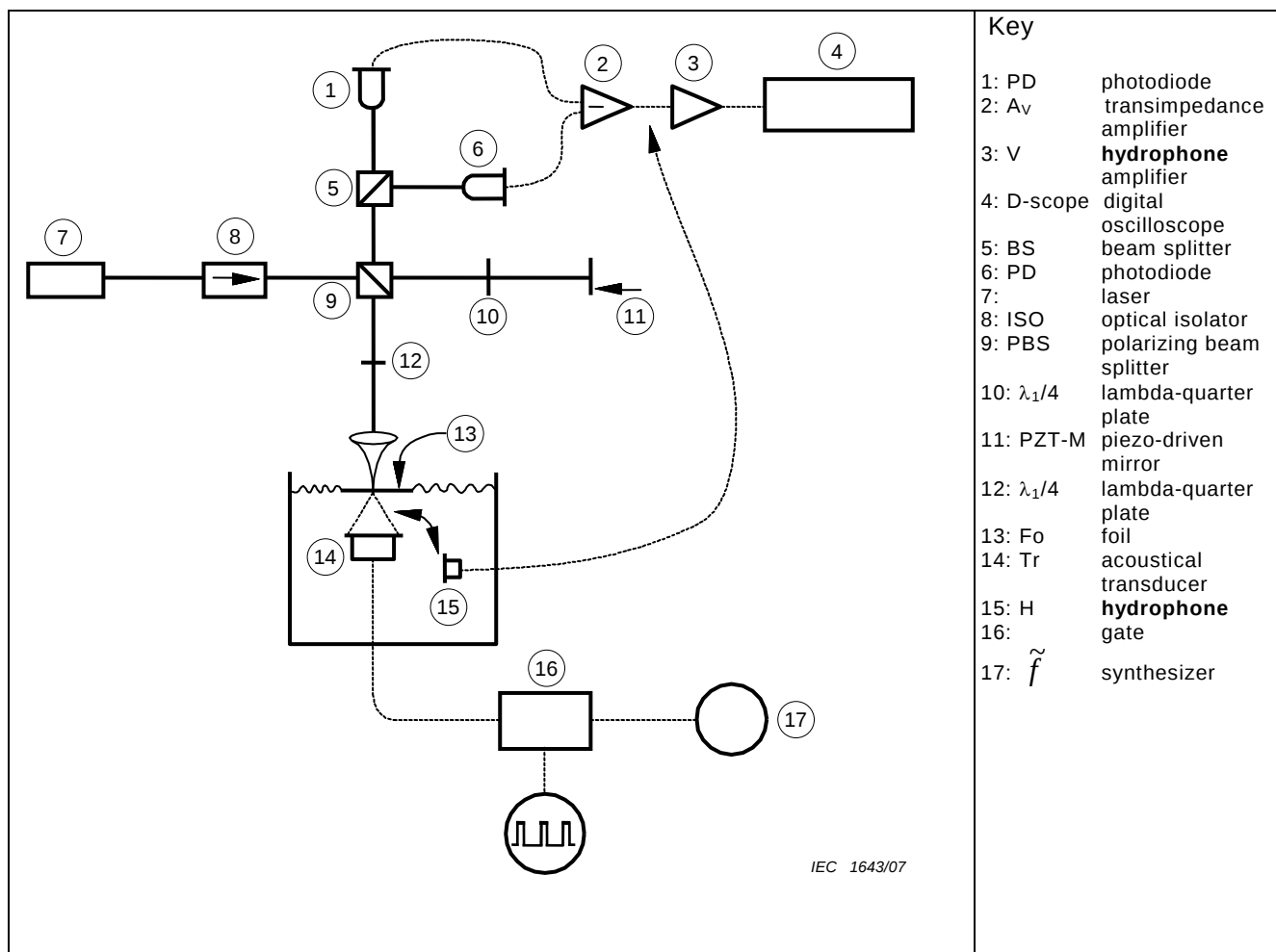


Figure F.1 – Experimental set-up of the interferometric foil technique

After storage of the reference data, the foil is removed and the **hydrophone** in question is fixed at the same place as the laser spot before. A certain amount of water is added to immerse the **hydrophone**. Alternatively, the transducer may be rotated as is shown in Figure F.1, for simplicity. The **hydrophone** is connected with the input of the amplifier V. Then the measurement is repeated under identical excitation conditions.

The **end-of-cable loaded sensitivity**, M_L , is obtained by

$$M_L = \frac{1}{\omega c \rho V(f=0)} \frac{2 \pi T F \hat{U}}{\lambda_l} \frac{U_H}{U_S} \quad (\text{F.3})$$

where

- c is the speed of sound in water;
- ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water);
- U_H is the voltage of the **hydrophone** measurement;
- $\omega (= 2\pi f)$ is the circular frequency of the sound field.

Here, the **hydrophone** output is electrically loaded by the input impedance of the amplifier V.

F.2.3.1.2 Data correction

The determination of the **end-of-cable loaded sensitivity**, M_L , is influenced by three systematic effects, which require data correction using theoretical models, as follows.

F.2.3.1.3 Spot diameter

Both the **hydrophone** and the laser beam focused on the foil cannot be assumed to be point detectors and spatial averaging effects should be taken into account. To quantitatively describe this effect [45], the transducer is considered as a planar piston. The displacement distribution is obtained from the Rayleigh integral solution [46], and all measured average values can be related to the peak pressure values [45].

F.2.3.1.4 Multipass effects in the foil

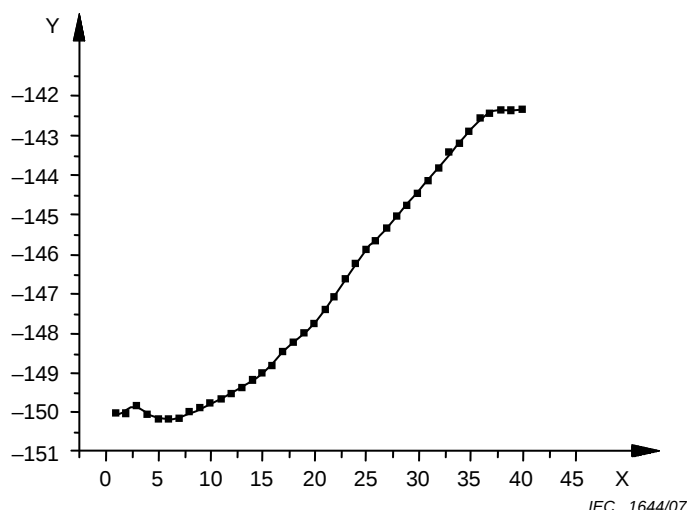
At the position of the ultrasound focus, the fluid is covered by a coated foil to improve the optical reflectivity. The incident sound field is partially reflected inside the foil and the metallic layer, and this multibeam interference influences the displacement of the foil. Since the phase front at the focus of a sound beam is nearly plane, a simple resonance model [45] using plane waves can be applied to quantitatively describe the systematic error due to this effect. It yields an acoustic transmission factor, TF , for the displacement, which is inserted into equation (F.2) and equation (F.3).

F.2.3.1.5 Frequency response of the photodetector

In contrast to the frequency dependence of the amplifier gain, $V(f)$, occurring in both measurements, the frequency response of the photodetector influences the **end-of-cable loaded sensitivity**, M_L . A measurement of the transfer function using an optical mixing oscillator was carried out and all interferometer data corrected.

F.2.3.1.6 Results

As an example, Figure F.2 shows the **end-of-cable open-circuit sensitivity**, M_c , of a coplanar membrane hydrophone with a layer thickness of 25 μm .



Key

X f (MHz)
Y M_c (dB re 1V/Pa)

Figure F.2 – End-of-cable open-circuit sensitivity, M_c , of a coplanar membrane hydrophone

The uncertainty of this measurement was frequency dependent. Between 1 MHz and 5 MHz, 9,5 %, and in the range 5 MHz to 20 MHz, 8,0 % were estimated. These values increased to 10 % at 30 MHz and 12 % at 40 MHz. The uncertainty values given use a coverage factor of $k = 2$ and provide a confidence level of 95 %.

F.2.3.2 Implementation II

F.2.3.2.1 Measurement system

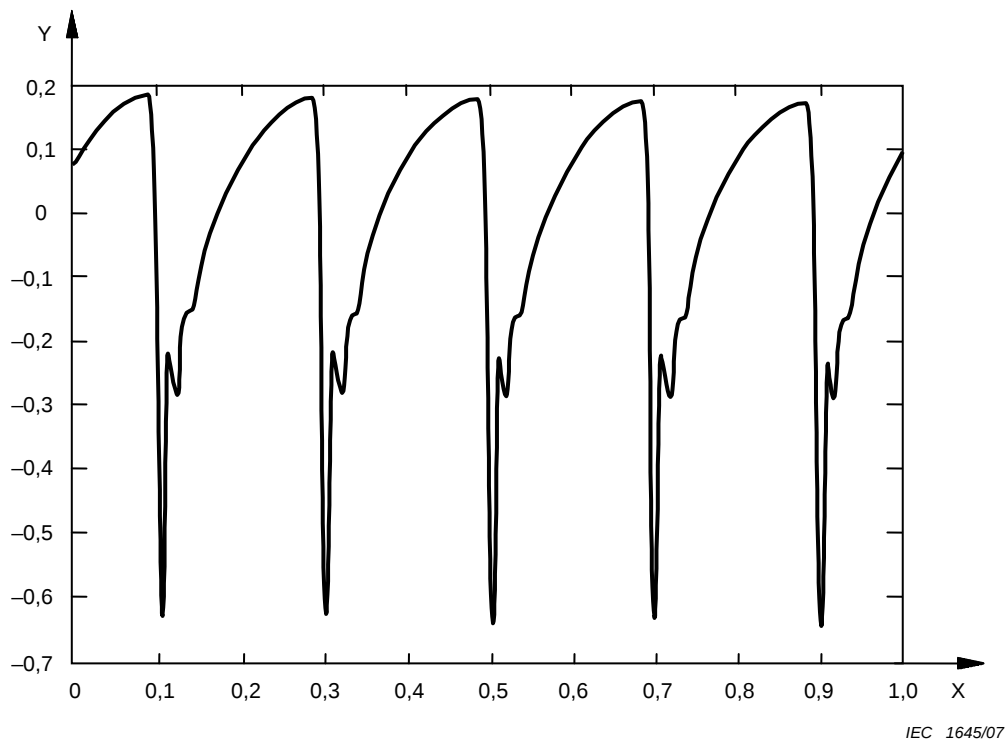
The optical interferometric method, developed as a primary standard method of calibrating ultrasonic **hydrophones** over the frequency range 500 kHz to 20 MHz, has been described in detail previously [47] and only a brief description is given here. The technique has been validated for frequencies above 500 kHz by international intercomparison between National Standards Laboratories [48] and has become well established as a primary standard. A good understanding has been developed of the sources of calibration **uncertainty**, with typical overall **uncertainties** for frequencies up to 20 MHz being 3 % or 4 % when expressed at a 95 % confidence level.

The pellicles used for the measurements are 3,5 μm and 5 μm thick polyethylene terephthalate film membranes coated with a 25 nm layer of gold. As the optical beam traverses the acoustic beam in this arrangement, the opportunity exists for the two beams to interact. The source of the interaction is the change in refractive index due to local changes in density of the medium in the compressional and rarefactional parts of the acoustic wave. This has implications for the acousto-optic interaction described in F.2.3.2.4.4.

F.2.3.2.2 The acoustic field

Calibrations are carried out using focused transducers of nominal centre frequency 5 MHz. Two focal lengths are used in order that some of the systematic **uncertainties** associated with the calibration (acousto-optic, spatial averaging) can be investigated. The nominal focal positions of the transducers are 50 mm and 150 mm. They are driven using tone-bursts of sufficient amplitude to generate strongly ~~non-linearly~~ **nonlinearly** distorted waveforms at the field position of interest (the focus). In this way, as demonstrated in Figure F.3 for a 0,5 mm, 9 μm coplanar membrane **hydrophone**, harmonics in the received **hydrophone** waveform can be detected up

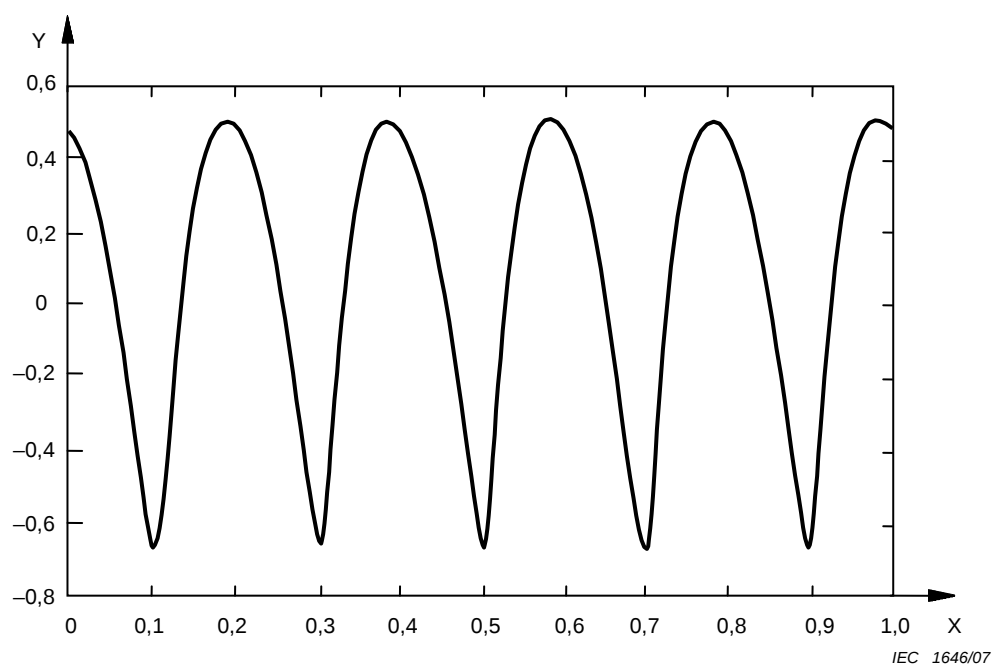
to 100 MHz. The close approximation to an ideal sawtooth should be noted, with the amplitude of successive harmonics showing a close to $1/n$ dependence in amplitude, where n is the harmonic number. While focused transducers need to be applied to generate sufficient acoustic pressures, their use has implications for the corrections, particularly spatial averaging, where the higher harmonics are of progressively narrower beamwidth (see F.2.3.2.4.3).



Key

X time (microseconds)
Y amplitude (volts)

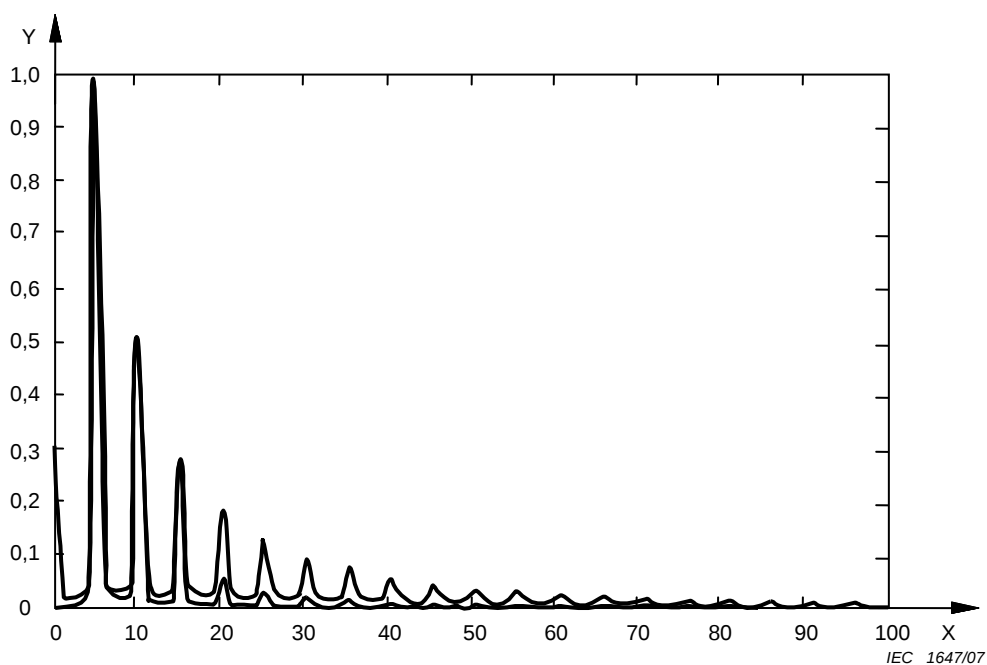
Figure F.3 – Hydrophone waveform generated by a 9 µm coplanar membrane hydrophone positioned at the focus of a 5 MHz transducer (focal length 51 mm)



Key

X time (microseconds)
Y amplitude (volts)

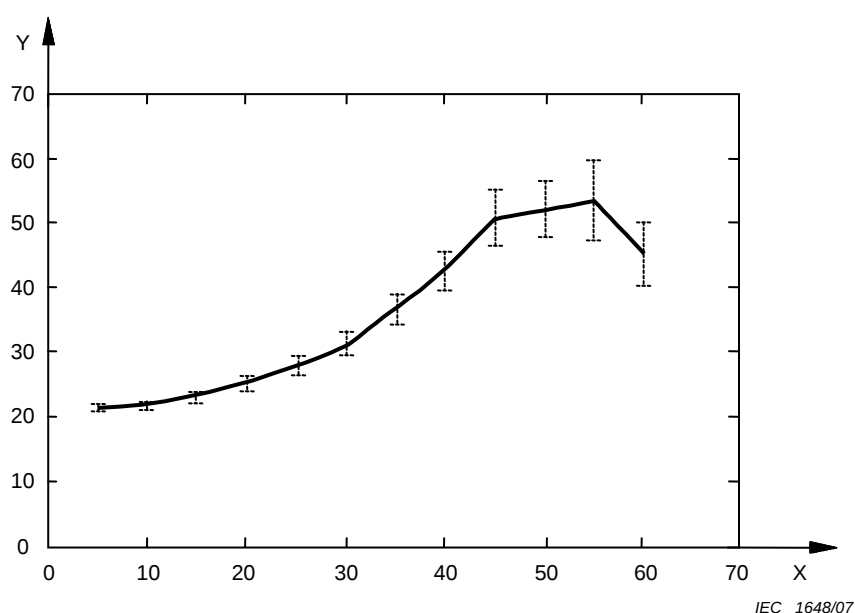
Figure F.4 – Interferometer (displacement) waveform generated with the pellicle positioned at the focus of the 5 MHz transducer (focal position 51 mm)



Key

X frequency (MHz)
Y normalised amplitude

Figure F.5 – Frequency spectrum of the displacement waveform (lower curve) and the differentiated displacement waveform (upper curve)



Key

X frequency (MHz)

Y sensitivity (nV/Pa)

Figure F.6 – Sensitivity of a 0,2 mm active element diameter of a 9 µm bilaminar membrane hydrophone determined at 5 MHz intervals over the frequency range 5 MHz to 60 MHz

F.2.3.2.3 Calibrations

Figure F.4 gives the displacement waveform generated by the pellicle positioned at the focus, 51 mm from the focused 5 MHz transducer. Note the absence of any clear distortion of the waveform; this is confirmed by calculating the Fourier transform, shown in Figure F.5, the lower of the two curves (the displacement waveform). Differentiating the displacement spectrum yields the pressure spectrum and this is also shown in Figure F.5 (the differentiated displacement waveform), where frequency components up to 60 MHz can now be readily seen. By comparing the output of the **hydrophone** placed at the same position in the field with the differentiated pellicle spectrum, the **hydrophone** can be calibrated over the frequency range of interest. Figure F.6 shows the calibration results derived for a 9 µm bilaminar membrane **hydrophone** of active element diameter 0,2 mm. The device has a theoretical resonance in its frequency response at 55 MHz which can clearly be seen in the calibration results. The **uncertainties** given on the plot are random **uncertainties** and degrade above about 40 MHz due to the diminished signal-to-noise ratio of the pellicle signal content at these elevated frequencies.

F.2.3.2.4 Calibration corrections and sources of measurement uncertainty

In this subclause, the most significant sources of measurement **uncertainty** associated with the calibration will be briefly outlined.

F.2.3.2.4.1 Interferometer frequency response

The frequency response of the interferometer is essentially that of the avalanche photodiodes and amplifier. This has been measured in the range 1 kHz to 20 MHz in the past, using a frequency response calibrator developed specifically for the purpose [49]. Extension of the working frequency range of the interferometer up to 60 MHz required modifications to be made to the frequency calibrator. Using the modified frequency calibrator, the frequency response of the interferometer was determined up to 100 MHz. **Uncertainties** in the frequency response calibration varied from 3,5 % (20 MHz) to 4,3 % (40 MHz).

F.2.3.2.4.2 Pellicle transmission coefficient

The calibration results must be corrected for the transmission properties of pellicles. Two approaches to deriving this correction are possible, one theoretical and the other experimental. By the use of simple acoustic theory for propagation of plane waves through layers of dissimilar material, a model was developed to calculate the frequency-dependent transmission coefficient of the pellicles. This assumes that attenuation of the acoustic beam in the 25 nm-thick gold layer is negligible. Further, an experimental method of determining the transmission coefficient over the range 2 MHz to 60 MHz was devised, based on a substitution method using a ~~non-linearly~~ **nonlinearly** distorted field generated by a 2 MHz fundamental transducer. The pellicle is positioned between the transducer and a **hydrophone** (with the pellicle being placed very close to the **hydrophone**), and the transmission coefficient of the pellicle determined. Through a combination of theory and measurement, a frequency-dependent correction is applied, whose **uncertainty** varies from 1% at 5 MHz to 2 % at 40 MHz.

F.2.3.2.4.3 Spatial averaging correction

The narrow beamwidths of the harmonics generated by the 5 MHz focused transducers make it necessary to correct for the spatial averaging of the pressure distribution over the active element of the **hydrophone**. An experimental investigation of spatial averaging was undertaken by carrying out beam plots at the focus of the transducer, using the 0,2 mm active element diameter, 9µm bilaminar membrane **hydrophone**, Fourier transforms of the waveforms being carried out so that the harmonic beamwidths could be derived. It is assumed that no spatial averaging corrections are required for the laser spot, which is 0,1 mm in diameter. **Uncertainties** in the spatial averaging corrections derived using this assessment varied from 1 % at 5 MHz to 6 % at 40 MHz.

F.2.3.2.4.4 Acousto-optic interaction

Since the optical beam traverses the acoustic beam in the experimental arrangement used, the opportunity exists for the two beams to interact. This means that the displacement measured by the interferometer is not the true displacement of the pellicle membrane, since the optical path length will change due to both the pellicle movement and the variation in the refractive index along the path of the laser beam. To account for the effect, a relatively large correction should be applied to the measured displacement, which is mainly accomplished by an effective refractive index for water. The accuracy of the correction has been validated for the linear plane wave regime used for low frequency calibrations [47], but the high amplitude ~~non-linear~~ **nonlinear** focused fields used in this work lead to an increase in the **uncertainty** from the refractive index. The acousto-optic effect is the subject of a continuing assessment but work completed to date indicates the **uncertainty** contribution made by the variation in the refractive index is no more than 1 % over the frequency range of interest. The non-plane wave contribution to the effect is estimated to vary from 0,5% at 5 MHz to 3 % at 40 MHz.

F.2.3.2.5 Overall measurement uncertainty

An assessment of the **uncertainty** of the optical interferometer method of high frequency calibration has been published [50] with estimates of the expanded measurement **uncertainties** varying from 7 % at 20 MHz to 11 % at 40 MHz.

Annex G (informative)

Waveform concepts

G.1 Overview

Hydrophone calibration relies on the application of a specified and stable ultrasonic field. The characteristics of this applied field may vary, depending on the electrical waveform applied to the transducer, details of the transducer (flat, planar or focused) and the position in the ultrasonic pressure field chosen from which to undertake the calibration. Various concepts are applicable and these are described in detail in G.1 to G.5, and summarized in Table G.1.

**Table G.1 – Temporal waveform and hydrophone position concepts
described in this annex**

Temporal waveform concepts		Hydrophone position concepts	
a	Narrow-band tone-burst	A	Near field position
b	Broadband waveform resulting from narrow-band tone-burst utilizing non-linear nonlinear propagation	B	Far field position
c	Broadband pulse	C	Far field position with long propagation path to achieve non-linear nonlinear distortion
d	Continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry	D	Geometric spherical focus position with focusing source transducer (linear propagation)
e	Continuous wave frequency sweep with time gating frequency analysis TGFA	E	Geometric spherical focus position with focusing source transducer (non-linear nonlinear propagation)

Additionally, Clause G.5 describes special considerations when calibrations are carried out close to the face of a planar transducer (hydrophone position concept A, described in G.4.1).

G.2 Temporal waveform, frequency concepts and hydrophone positioning for comparison calibrations of hydrophones

All results obtained according to this clause refer to a certain ultrasonic frequency. They are considered as a function of frequency and can basically be understood as amplitudes in a frequency spectrum.

The concepts that relate to the temporal waveform and frequency identification are:

- a. narrow-band tone-burst;
- b. broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after ~~non-linear~~ nonlinear propagation;
- c. broadband pulse;
- d. continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (TDS). (See Annex H.)
- e. continuous wave frequency sweep with TGFA [39].

The concepts regarding the **hydrophone** position in the ultrasonic field are:

- A. near field position;
- B. **far field** position;
- C. **far field** position with special reference to a long propagation path in order to achieve ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion (in connection with temporal waveform concept B).

Assuming a plane-circular transducer, it can generally be said that the field is composed of a plane direct wave and non-plane edge wave. According to hydrophone position concept A, the **hydrophone** is placed fairly close to the transducer, where, as they have different propagation path lengths, the two wave components can be separated from each other. By choosing an appropriate time gate, the direct, plane ultrasonic pulse can be picked out. According to hydrophone position concepts B and C, on the other hand, the **hydrophone** is placed on the **beam axis** in the far field. In this region, there is only a relatively small path length difference between the two wave components, so they inevitably interfere with each other, but the resulting field character is almost plane, the main restriction being that of a limited diameter of the central lobe of the field.

- D. geometric spherical focus position with focusing source transducer (low amplitude or linear excitation);
- E. geometric spherical focus position with focusing source transducer (high amplitude excitation).

In hydrophone position concepts D or E, the source transducer is focusing so that the beam has the same shape at the geometric focus as that obtained in the **far field** of a non-focusing transducer. For hydrophone position concept D, the advantage of using a focusing transducer as a source is that conditions similar to hydrophone position concept B are obtained in a shorter path length under linear excitation conditions, thereby reducing attenuation effects. For hydrophone position concept E, the field of a focusing transducer at its geometric focus is used to achieve ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion through high amplitude voltage excitation. The advantages of hydrophone position concept E are that the attenuation is reduced by the shorter path length for both the fundamental and higher harmonic components of the pressure waveform and the ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion is obtained by the increased pressure amplitude caused by the focal gain of the transducer.

NOTE Certain combinations of the temporal waveform concepts and the **hydrophone** position concepts are preferred in the literature (although up to now mostly in the frequency range up to 15 MHz or even lower). These are the combinations aB [51], bC [52, 53], cA [54] and dB [55, 56, 22]. Other combinations are also possible.

G.3 Temporal waveform and frequency coverage concepts

G.3.1 Using a narrow-band tone-burst (concept a)

Here, a rectangular, sinusoidal tone-burst of fixed frequency, f , and burst duration, τ , is applied. The **hydrophone** output voltage does not usually show a clear rectangular burst, but rather a signal with initial and final transients and ideally with a central part of constant amplitude. The burst should be sufficiently long to achieve such a constant **hydrophone** signal amplitude. The constant signal amplitude is measured, for example by means of a calibrated oscilloscope. The result obtained refers to the particular frequency chosen.

This concept is characterized by the following features:

- it is a single-frequency method. If the result is desired for several frequencies, the measurement should be repeated at these frequencies. As this involves changing transducers and realigning, this is time-consuming;

- the frequency range of the source transducer should cover the desired frequency band, therefore, in practice, it should be a damped, broadband transducer well-suited to the frequency range in question;
- the transducer should produce ultrasonic wave amplitudes high enough to be well above the hydrophone noise, taking into account the ultrasonic attenuation along the propagation path;
- if the hydrophone output voltage is measured with a broadband instrument, the harmonic content of the signal should be checked and should be lower than –30 dB in comparison with the fundamental frequency.

NOTE If the harmonic content of the signal is greater than –30 dB, band-pass filtering of the signal at the fundamental frequency, or a spectrum analysis of the signal, may be used to eliminate the effect of the content of the second and higher harmonics, by solely analysing the fundamental component.

G.3.2 Using a broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after ~~non-linear~~ nonlinear propagation (concept B)

A sinusoidal tone-burst of high voltage is applied to the transducer. The ultrasonic signal is propagated over a long distance until a highly asymmetric time waveform is measured by the **hydrophone** at the hydrophone positions described by either concept C or concept E. This distorted waveform is characterized by peaked compressional half-cycles and shallow rarefactional half-cycles. The harmonic content of the spectrum contains equidistant frequencies separated by the fundamental frequency value and with amplitudes that roughly decrease as $1/n$ if n is the harmonic number. The signal received is either fed to a spectrum analyzer or into a fast Fourier transform (FFT) calculation stage and the measurement result for a number of discrete frequencies is obtained.

The ultrasonic source itself can be a narrow-band, resonant transducer with a frequency well below the range of interest. However, its frequency should not be too low, as harmonic amplitudes that are high enough should be produced whose frequencies should not be too far removed from the fundamental frequency. For the frequency range of this standard and in view of the requirements for determining the frequency-dependent sensitivity as required in IEC 62127-3, the fundamental frequency of this kind of transducer should be in the range of roughly 1 MHz. The transducer should be able to produce pressure amplitudes in the megapascal range, but without producing too much heat, as this would disturb the temperature stability of the measurement tank (see 6.2) and could also lead to an instability of the transducer radiation conductance. These problems can be handled by intermittent operation using a suitable duty factor.

G.3.3 Using a broadband pulse (concept C)

A short broadband pulse of duration, τ , is produced by the source transducer. The **hydrophone** output signal is again fed to a spectrum analyzer. In this case, the frequency resolution of the spectrum amplitude is equal to the reciprocal of the time interval over which the broadband pulse is measured, and the frequency range covered by the spectrum depends on the pulse produced.

The source transducer can be either a damped, resonant transducer with the main part of the pulse frequency spectrum being around its resonance frequency as determined chiefly by its thickness, which should be low for the frequencies of this standard, or it can be a thick transducer excited by a short current spike as obtained by short-circuiting a high voltage. The main problem in reaching the frequency range of this standard in the latter case is achieving a rapid switching of high voltages and currents. The thickness of the transducer in the latter case determines the time delay of the arrival of the mechanical pulse radiated at the rear surface of the transducer, and disturbs the measurement if this delay is too short.

G.3.4 Using a continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (concept D)

A continuous wave signal is used with a linear frequency sweep over the frequency range of interest and at a constant sweep rate. The **hydrophone** output signal is passed through a narrow-band (tracking) filter, which is swept synchronously, but with a certain frequency offset in relation to the generator frequency. This frequency offset is adjusted to the time-of-flight (propagation time) of the direct ultrasonic signal from the transducer to the **hydrophone**, the time-of-flight being determined by the transducer/**hydrophone** distance and the speed of sound, which is a function of the water temperature. This technique suppresses the potential influence of reflected signals, which are, strictly speaking, all those signals that have a propagation time differing substantially from that of the direct signal.

The main component of the electronic equipment in this case is a special kind of spectrum analyzer able to perform all the relevant operations mentioned. The **hydrophone** output voltage is obtained as a continuous function of frequency. The electronic equipment, particularly the spectrum analyzer, should operate in the frequency range of interest.

The frequency and amplitude requirements with respect to the transducer are the same as those of G.3.1.

G.3.5 Continuous wave frequency sweep with TGFA (concept E)

Details of the time gating frequency analysis (TGFA) technique can be found in [39].

G.4 Hydrophone position concepts

G.4.1 Near-field hydrophone position (concept A)

The **hydrophone** is positioned fairly close to the transducer on the **beam axis**. The direct, plane wave burst or pulse is picked out from the **hydrophone** output signal by adjusting a time gate.

The suitability of the transducer should be checked by observing the **hydrophone** output signal when the **hydrophone** is moved laterally. Ideally, the **hydrophone** output signal is independent of the lateral position (in the usable paraxial region, see G.5.2), if all parts of the transducer surface vibrate with uniform amplitude and phase. Issues related to calibrations close to the face of a transducer are covered in Clause G.5.

The geometrical region usable for this type of measurement can be assessed as follows if τ is the burst or **pulse duration**.

G.4.2 Far field hydrophone position (concept B)

NOTE This applies only in connection with temporal waveform concepts a, c, d and e. For the hydrophone position type in connection with temporal waveform concept b, see G.4.3.

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** in the **far field** of the transducer. The **far field** begins at the location of the last axial maximum, which should be determined for the highest frequency in question. This distance is to be regarded as the minimum distance for the **hydrophone** position in this case.

For a theoretical, plane-circular piston source, the last axial maximum is at a distance $z = a_t^2 f / c$. This distance is proportional to the frequency, and so in the frequency range of this standard, appreciable distance values might result, depending on the transducer radius. However, the propagation path length should not generally exceed the value of a few decimetres in order to avoid as far as possible the consequences of ultrasonic attenuation, and so source transducers with a sufficiently small diameter should be chosen in this case.

G.4.3 Far field hydrophone position with special reference to a long propagation path in order to achieve ~~non-linear~~ nonlinear distortion (concept C)

In connection with temporal waveform concept b, given in G.3.2, the propagation path should be sufficiently long to achieve both significant ~~non-linear~~ nonlinear distortion of the waveform and to ensure that the acoustic pressure distribution is sufficiently broad so that spatial averaging effects are maintained below a specified level (see Annex J). This can be achieved using relatively large diameter plane-piston transducers whose near-field distance ($a_t^2 f/c$) may be in the range 200 mm to 400 mm [52]. The degree of ~~non-linear~~ nonlinear distortion occurring at the position of the **hydrophone** may usefully be characterized by the ~~non-linear~~ nonlinear distortion parameter, σ , whose value depends on the pressure amplitude at the source (p_0), and for plane waves is given by

$$\sigma = 2\pi \frac{\beta p_0 f_t z}{\rho c^3} \quad (\text{G.1})$$

where

- $\beta = 1 + B/(2A)$ is the ~~non-linearity~~ nonlinearity parameter for water (approximately 3,5 with values for the Fox-Wallace parameter B/A being given in [57], for example);
- f_t is the fundamental drive frequency of a signal used to generate the ~~non-linear~~ nonlinear distortion;
- z is the propagation distance, distance between a hydrophone and an ultrasonic transducer;
- ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water).

For optimum comparison conditions, the value of σ should be 3, a situation that corresponds to a ~~non-linear~~ nonlinear loss of 6 dB in the amplitude of the fundamental [58]. For this value of σ , the waveform takes on the appearance of the classical sawtooth, with spectral harmonic amplitudes varying as $1/n$ where n is the harmonic number. Using these properties, it is useful to evaluate the pressure amplitude generated at high frequencies as this will affect the accuracy of any calibration. Assuming that the $\sigma = 3$ condition holds (i.e. the pressure amplitude at the field position is 50 % of the pressure amplitude at the source, p_0), the pressure amplitude generated at the upper frequency limit of the **hydrophone's** frequency band (f_u) can be readily derived as $0,5 p_0 f_t/f_u$ (essentially, the ratio f_t/f_u is equivalent to $1/n$, where n is the harmonic number corresponding to the upper frequency limit of the hydrophone).

NOTE For water at 22 °C, equation (G.1) leads to $\sigma = 6,7 p_0 f_t z$ where

- p_0 is in MPa;
- f_t is in MHz;
- z is in metres.

These approximate expressions are intended for guidance, and assume plane wave and lossless propagation. The self-focusing behaviour of piston sources can be taken into account to provide a more accurate treatment [58]. The lossless propagation condition is valid providing the parameter $\sigma/(\alpha z)$ is $\gg 1$, where α is the small-signal, plane wave amplitude attenuation coefficient of the measurement liquid (water), which is proportional to the square of the frequency (values of which are given in Annex E). This criterion is more generally fulfilled at lower fundamental frequencies, for example, at 1 MHz or 2 MHz. At higher frequencies, ($\sigma/(\alpha z) \cong 1$) small-signal attenuation of the fundamental will limit the distortion and therefore reduce the harmonic content in the field. amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water).

In any implementation of this method, it is recommended that the frequency content of the axial ~~non-linear~~ **nonlinear** field of the transducer should be investigated to establish the optimum comparison position(s) subject to the recommendations provided in this subclause. These position(s) should maximize the signal-to-noise ratio for frequencies up to f_u .

G.4.4 Geometric spherical focus position with focusing source transducer (low voltage or linear excitation) (concept D)

NOTE This applies only in connection with temporal waveform concepts a, c, d and e. For the hydrophone position type in connection with temporal waveform concept b, see G.4.3.

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** at the geometric spherical focus of the focusing source transducer [59]. If the geometric focal length of the transducer, F , is not known, it can be determined from z_{pf} , the distance of the pressure focus (which is the position of the maximum pulse-pressure-squared integral along the beam axis) from the focusing transducer, and the formula

$$F = \left(\frac{1}{z_{pf}} - \frac{c}{fa_t^2} \right)^{-1} \quad (G.2)$$

For linear propagation conditions, the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation parameter, σ_m (see IEC 62127-1), for focusing transducers should be less than 1.

G.4.5 Geometric spherical focus position with focusing source transducer and high voltage excitation in order to achieve ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion (concept E)

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** at the geometric spherical focus of the focusing source transducer. If the geometric focal length of the transducer, F , is not known, it can be determined from the location of the pressure focus under linear excitation conditions as described in G.4.4. To achieve sufficient ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion, the ~~non-linear~~ **nonlinear** propagation parameter, σ_m , should be 3 or greater.

G.5 Special considerations for calibrations close to the face of a transducer

G.5.1 General requirement

The axial distance between **hydrophone** and ultrasonic transducer surface, z , should be

$$z \geq \frac{c\tau}{2} \quad (G.3)$$

so that any pulse reflected from the **hydrophone** to the source and back to the **hydrophone** will not interfere with the end of the pulse initially incident on the **hydrophone**.

G.5.2 Influence of edge waves

A plane-circular source transducer of radius, a_t , and a field point, P, at some axial distance from the transducer, ~~z~~ z , and lateral distance a_p from the **beam axis** are considered (see Figure G.1). The path length of the direct plane wave is z . The shortest propagation path length of the edge wave is $\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2}$, referred to as r in Figure G.1. The fundamental requirement is that τ should not be greater than the time-of-flight difference between the edge wave and the plane wave. This leads to the inequality

$$\tau \leq \tau_{\max E} = \frac{\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2} - z}{c} \quad (\text{G.4})$$

which can be modified to

$$a_p \leq a_{p\max E} = a_t - \sqrt{(c\tau)^2 + 2c\tau z} \quad (\text{G.5})$$

this being the inequality defining the paraxial region that can be used.

NOTE Depending on the actual set of parameter values, it might be that the inequality as outlined in equation (G.5) has no solution (which means, formally, that it has a negative solution), in which case this type of measurement is not possible. A remedy would be to reduce the burst or **pulse duration**, τ , and/or the **hydrophone** distance, z . The condition for the inequality as outlined in equation (G.5) having a positive solution, which means that this type of measurement is possible, can be formulated as follows:

$$z < z_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{a_t}{c\tau} \right)^2 - 1 \right\} c\tau \quad (\text{G.6})$$

G.5.3 Potential influence of head waves

The plane wave field near the transducer might also be disturbed by waves of another type. These are head waves caused by radial modes that might exist in the transducer during pulse excitation. If a radial wave in the transducer starts at the transducer rim and moves inside at velocity, v_t , which is assumed to be larger than the speed of sound, c , in the sound-propagating fluid, a field of head waves is radiated into the fluid and might arrive at the **hydrophone** and produce a disturbing output signal, depending on the **hydrophone's** position, as described, for example in [60] and [61]. The details depend largely on v_t . As there is usually no *a priori* knowledge about this quantity, no general recommendations can be given here. The practical details should be studied individually and experimentally (see [60]). The treatment below provides assessment formulae analogous to equation (G.4) and equation (G.5), which are helpful if v_t is known.

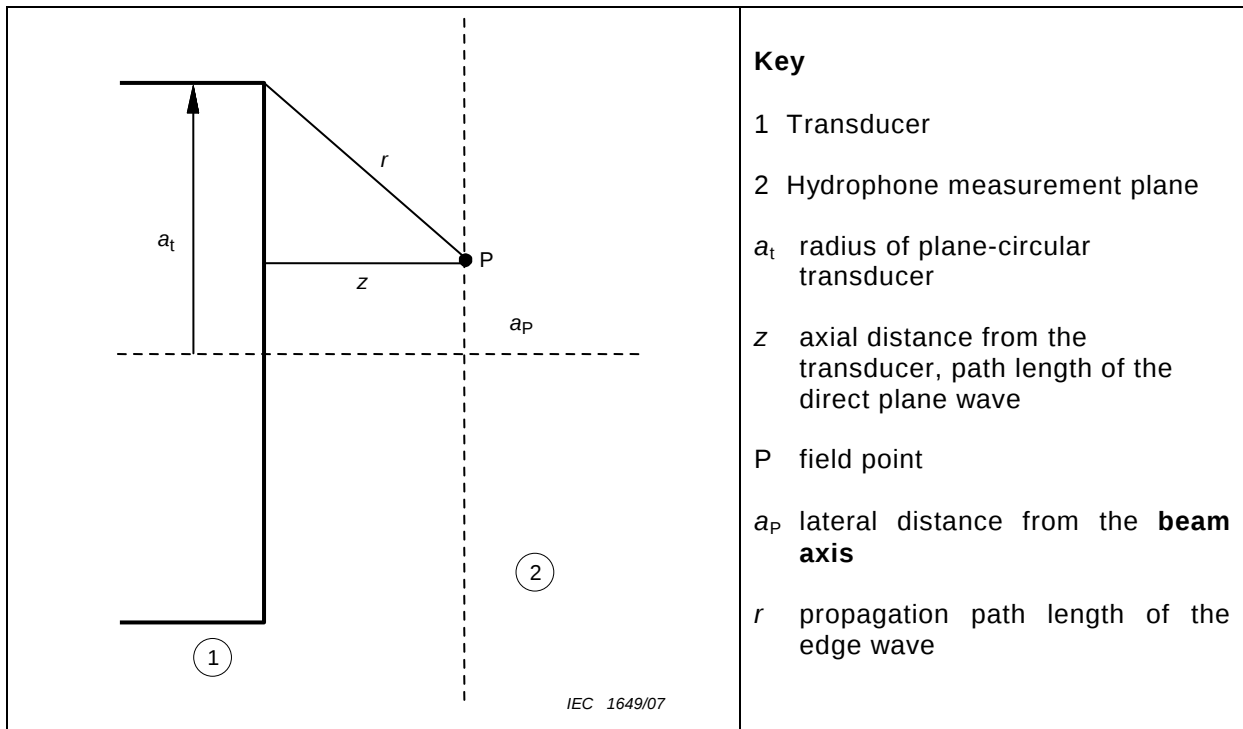


Figure G.1 – Coordinates of a field point, P, in the near field of a plane-circular source transducer of radius, a_t

G.5.4 Treatment of head waves close to the transducer

Consideration is given to a plane-circular source transducer of radius, a_t , according to Figure G.1. Consider the conical region (symmetrical with respect to the **beam axis**) whose base is the circular transducer surface and whose apex is the axial point

$$z = z_2 = a_t \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}, \quad (\text{G.7})$$

where

v_t is the speed of a radial wave in a transducer plate.

The generating line for this right circular cone is:

$$a_p = a_t - \frac{z}{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}. \quad (\text{G.8})$$

For points (z, a_p) in this region, two head waves will be present, one originating at the nearest point on the source perimeter and one at the furthest [60, 61]. On axis, these head waves coincide. At all points in this conical region, the nearest head wave arrives sooner than the edge wave, so its influence on the usable geometrical region should be considered. Unlike edge waves, head waves are not present at all points in the field. Outside the conical region, head waves either do not exist or arrive later than the edge wave and therefore need not be considered for the purposes of this standard.

Within the conical region defined above, the fundamental requirement when considering head waves is the same as for edge waves, i.e. the burst or pulse duration, τ , should be not greater than the time-of-flight difference between the nearest head wave and plane wave components. The time of arrival of the nearest head wave, t_H , is:

$$t_H = \frac{a_t - a_p + z \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{v_t} \quad (\text{G.9})$$

Therefore, in analogy to equation (G.4) and equation (G.5), the condition is:

$$\tau \leq \tau_{\max H} = \frac{a_t - a_p - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\}}{v_t} \quad (\text{G.10})$$

from which

$$a_p \leq a_{p\max H} = a_t - v_t \tau - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\} \quad (\text{G.11})$$

The inequality as outlined in equation (G.11) has positive solutions if

$$z < z_3 = \frac{a_t - v_t \tau}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} \quad (\text{G.12})$$

G.5.5 Statements on the usable paraxial plane wave region in the case of a near-field hydrophone position, considering both edge wave and head wave contributions

Assume that a **hydrophone** is positioned at an axial distance, z , from a plane-circular source transducer of radius, a_t , (according to Figure G.1) emitting a burst or pulse of duration, τ . The time-of-flight criteria lead to the following statements, depending on the actual value of z in relation to four reference values, the first three of which have been given as z_1 , z_2 and z_3 in equation (G.6), equation (G.7) and equation (G.12), and the fourth of which is defined by

$$z_4 = \frac{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} c \tau \quad (\text{G.13})$$

A complete set of different cases is given in the following.

- a) If $z \geq z_1$, the type of measurement considered is not possible due to a violation of the edge wave time-of-flight condition.

- b) If $z < z_1$ and $z \geq z_2$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in equation (G.5).
- c) If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z \geq z_3$, the measurement is not possible due to a violation of the head wave time-of-flight condition.
- d) If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z < z_3$ and $z \geq z_4$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in equation (G.5).
- e) If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z < z_3$ and $z < z_4$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in equation (G.11).

It should be noted that the **hydrophone's** whole sensitive area should be in the usable paraxial region so that R includes both the **hydrophone** radius plus, possibly, the lateral distance of the **hydrophone** centre from the **beam axis**.

It should also be noted that all the statements above are subject to the general requirement of inequality as outlined in equation (G.3).

Annex H (informative)

Time delay spectrometry – requirements and a brief review of the technique

H.1 General

Time delay spectrometry (TDS) was originally proposed [62] for analysis of loudspeaker behaviour in acoustically reflective environments. Later, it was suggested for calibration of **hydrophones** in the megahertz frequency range [55]. A comprehensive analysis of the TDS technique [63] reviews and examines in depth all space and instrumentation requirements needed for practical implementation of the TDS technique. A combination of TDS and reciprocity [56] has been used for absolute calibration of **hydrophones** and a number of experimental data are presented in [64]. The figure of merit in terms of frequency resolution has also been considered [22].

In this annex, the most important requirements of the TDS technique and its relevant parameters are briefly reviewed.

H.2 Calibration and performance evaluation of ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry

H.2.1 Ultrasonic field parameter measured

The primary parameter to be measured when using the TDS technique is acoustic pressure. The pressure amplitude is recorded concurrently with the electrical voltage produced at the hydrophone terminals. The ratio of the voltage and its corresponding pressure yields the end-of-cable loaded sensitivity as a continuous function of frequency.

H.2.2 Ultrasonic frequency range over which the technique is applicable

The technique is used in the audible acoustics range from about 20 Hz and in biomedical ultrasonics from 1 MHz to 40 MHz. The technique has also been successfully implemented from 100 kHz to 1 MHz.

Limitations are:

- a) the frequency range of the measurement equipment available;
- b) in the case of a substitution calibration, the availability of calibrated reference **hydrophones** in the frequency range of interest.

NOTE A modification of the TDS allows calibration bandwidth to be extended to at least 60 MHz [39].

H.2.3 Ultrasonic field configuration for which the technique is applicable

Plane waves (continuous wave and swept).

H.2.4 Spatial resolution

The output signal represents the frequency spectrum of the measured temporal signal. The range resolution depends on the ratio of the filter bandwidth to the sweep rate used. **Uncertainty** in the frequency resolution of the performed measurement can, in general, be expressed as

$$f = 1/t_{\text{TDS}} \quad (\text{H.1})$$

where

f is the frequency in hertz; and

t_{TDS} is the time available for a free field measurement in TDS, in seconds.

Both frequency response and directivity patterns can be readily obtained by using the TDS technique; see examples in [55, 56, 57, 63, 64, 65].

H.2.5 Sensitivity of technique

The sensitivity of the technique depends on the input signal available from the **hydrophone** being tested. At acoustic pressure amplitudes as low as 1 kPa, a typical signal-to-noise ratio of approximately 50 dB can be achieved. The maximum achievable signal-to-noise ratio is on the order of 75 dB. Typically, changes of about 0,2 dB in the **end-of-cable loaded sensitivity** can be detected.

H.2.6 Range over which the sensitivity is measured

End-of-cable loaded sensitivity or **end-of-cable open-circuit sensitivity** down to approximately –300 dB re 1 V/μPa, (1×10^{-9} V Pa⁻¹), can be measured readily.

H.2.7 Reproducibility

Typical reproducibility is in the range of $\leq \pm 5\%$ (in the range 0,1 MHz to 10 MHz) for sensitivities > 3 nV/Pa. Achievable reproducibility is approximately 2 %.

H.2.8 Impulse response

Impulse response can be obtained from a Fourier transform of the frequency response if the phase of the TDS signal is recorded. The resolution of the impulse response is commensurate with the frequency range recorded [66].

H.2.9 Procedure for performing measurements

Consult [22, 55, 56, 63, 64, 66] for a typical measurement arrangement. The procedures are briefly given in Clauses H.3 and H.4.

H.3 Measurement procedure (sensitivity intercomparison)

- a) Position and align transducer (transmitter) and receiver (previously calibrated **hydrophone** [15, 66, 67]) in a degassed, distilled water bath, controlled to $\pm 0,5$ °C.
- b) Measure logarithmic spectrum in the selected frequency range.
- c) Store measured spectrum (frequency response) in memory.
- d) Replace known (reference) ultrasonic **hydrophone** with a **hydrophone** to be calibrated.
- e) Repeat steps a), b) and c).

NOTE 1 Positioning can be done as follows: verify that the **hydrophone** to be calibrated is in the same field position as the reference **hydrophone** by either a) pulsing the transducer (transmitter) and adjusting the axial distance so that the pulse propagation delay is the same for both **hydrophones**, and then moving the **hydrophone** to be calibrated laterally to maximize the signal; or b) with the TDS time delay set the same as for the reference **hydrophone**, positioning the **hydrophone** to be calibrated so that its signal is maximized.

- f) Plot the difference of both logarithmic spectra. (If the reference **hydrophone** has a flat frequency response, the difference represents the frequency response of the **hydrophone** being calibrated.) See [22, 55, 56, 62, 63, 64] for details.

NOTE 2 The TDS technique can be used both in performing sensitivity intercomparisons and absolute (reciprocity) calibration. See [22, 56] for details. However, for the sensitivity intercomparison, a reference **hydrophone** having a known frequency response as a continuous function of frequency is required.

H.4 Measurement procedure (reciprocity calibration)

Reciprocity calibration requires the use of a fairly complex measurement set-up and special equipment. More specifically, a wideband bridge circuit, to decouple the transmit and receive signals, and wideband transducer dummy load are needed. Instead of a dummy load, two identical transmitters can be used. See [22, 56] for details. The measurement **uncertainty** of the combined reciprocity calibration measurement procedure/TDS technique has been reported to be less than 10 % in the frequency range 2 MHz to 15 MHz. Below 2 MHz and above 15 MHz the **uncertainty** increases to approximately 20 %, primarily due to the signal-to-noise ratio available.

H.5 Limitations

One basic limitation of the TDS technique is the assumption that the propagation medium is non-dispersive. This does not pose any practical difficulty as the **hydrophone** calibration is carried out in degassed and deionized water.

Annex I (informative)

Determination of the phase response of hydrophones

I.1 Overview

The measurement of high-frequency or ~~non-linear~~ **nonlinear** distorted waveforms is often hindered by the non-ideal transfer characteristic of the **hydrophone** used. Correct results can be obtained by deconvolution of the measured waveforms using the complex-valued transfer function of the detection line in the frequency domain (see IEC 62127-1). This procedure requires the phase response of **hydrophones** to be determined in addition to the amplitude of sensitivity during calibration being measured [76], [77], [78]. This annex describes the current status of available techniques for the determination of phase response of **hydrophones**.

In general, both, the end-of-cable loaded sensitivity and the end-of-cable open-circuit sensitivity are complex-valued quantities, which can be expressed in amplitude and phase. The amplitude has been obtained from various different calibration techniques known for many years (see Clause 5, for example). The determination of phase requires two particular properties of the measurement: first, a coherent detection process is needed for acquiring amplitude and phase during the measurement; second, a phase standard with a flat or at least well-known phase response is required for absolute phase calibration that is calibrated by a primary calibration or whose phase response is known *a priori*.

NOTE "Absolute" phase calibration meets many practical and technical difficulties and is not necessary for most application cases. "Absolute" is understood here in the sense of "referring to a standard source with ideally flat phase response".

To determine the phase response of **hydrophones**, techniques successfully applied to amplitude calibration can be extended to coherent detection. Additional difficulties, however, arise from the sensitivity of phase to both environmental conditions and the stringent conditions on adjustment of the distance between **hydrophone** and transducer. At a frequency of 20 MHz, a change in water temperature of 10 mK results in a phase change of 10° on a length of 100 mm. Since the water temperature can hardly be kept constant within this range for a long period of time, measurement techniques are required that acquire all data within seconds. Pointwise acquisition schemes, for example, used in reciprocity or optical interferometry, fail because of the long measurement cycle. In addition, a shift of 2 µm along the sound propagation direction results in a phase change of again 10° at 20 MHz demonstrating the difficult conditions in adjustment accuracy.

In the following sections, three techniques are described which were successfully applied to phase calibration in different laboratories. First, the principle of operation and an example of a result are presented and second, uncertainties and limitations are discussed.

I.2 Coherent time delay spectrometry

I.2.1 Principle of operation

Time delay spectrometry exploits the finite propagation time of ultrasound in a medium to ensure free field conditions during calibration [56, 62, 63, 68]. The pressure wave emitted by the transducer takes some time to reach the hydrophone and the instantaneous frequency of the received signal is shifted by

$$\Delta = \frac{f_{\text{Stop}} - f_{\text{Start}}}{t_s} \frac{l}{c} \quad (\text{I.1})$$

where

t_s is the sweep time;

l is the distance between hydrophone and transducer; and
 c is the speed of sound in a medium (usually water)

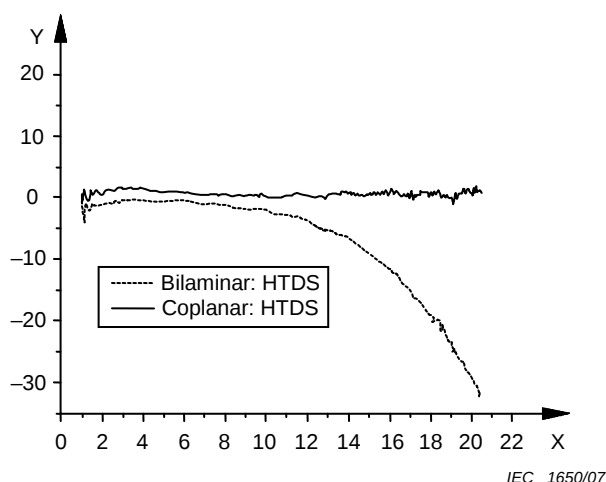
with respect to the frequency of the transmitting voltage applied to the transducer during a sweep between f_{Start} and f_{Stop} . If the analyser unit used for both generating the transmitting voltage and detecting the hydrophone signal can operate a frequency offset between the two signals, a narrow IF filter selects the length of the signal path of the sound. If the frequency offset is set to Δ , the direct path between transmitter and **hydrophone** is chosen and reverberation from the tank walls is filtered out.

In realizing the coherent detection technique, a network analyser has been exploited to generate and detect the signals. To ensure a fixed phase relation between the transmitting and receiving signal, a heterodyne scheme with a separate mixer closing the necessary phase locked loop (heterodyne time delay spectrometry (HTDS) [69]) is used. The network analyser is operated in the frequency offset mode and the local oscillator frequency set to $f_{\text{LO}} = 50$ MHz. A second mixer provides the transmitting signal fed into the transducer. Two measurements, one with the reference **hydrophone** and one with the **hydrophone** to be calibrated, are carried out under equal excitation conditions and the **hydrophone** frequency response is obtained by comparison of the results.

Another technique to separate unwanted signals from the measurement information works in the time domain instead of the frequency domain and uses the different propagation times of the signals [39, 69]. In a first step, the frequency response of the transducer-**hydrophone** transmission line is determined and the transducer is excited by a continuously swept voltage with a frequency increasing from f_{Start} to f_{Stop} . Then the frequency-dependent signal voltage acquired is converted to the time domain by an inverse FFT algorithm. The direct sound as well as reverberation signals and other disturbances are represented as signals on the time-scale appearing at their individual propagation times. Now a gate is set to time position $t' = c/l$, and all unwanted signal contributions are cancelled out.

I.2.2 Example results

The coherent TDS techniques can be applied to all common **hydrophones**. Figure I.1 shows measurement results for two membrane hydrophones with an active diameter of 1 mm and a layer thickness of 25 μm . An increase in the amplitude of sensitivity is connected with a phase change caused by the thickness resonance of the membrane at 40 MHz and 22 MHz, respectively.



Key

X f (MHz)
Y $\arg(M)$ (°)

Figure I.1 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for two membrane hydrophones

Results are for using the heterodyne time delay spectrometry (HTDS). The dotted line represents a bilaminar hydrophone, the continuous line represents a single layer hydrophone.

I.2.3 Uncertainties

The **uncertainties** depend on many parameters of the measurement. The most serious contribution arises, however, from the determination of the distance between the transducer and the **hydrophone**. It is mainly influenced by adjustment uncertainties and temperature fluctuations during the measurement. Table I.1 gives representative values for the calibration of a needle type **hydrophone**.

Table I.1 – Example of uncertainties (where a coverage factor, $k = 2$, is used) for a HTDS phase calibration of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm, expressed at a confidence level of 95 %

Frequency range MHz	Uncertainty Degrees (°)
2 - 5	15,9
5 - 12	8,8
12 - 20	13,0
20 - 30	19,1
30 - 40	25,0

NOTE The bilaminar hydrophone is of overall membrane thickness of 50 μm ; the single-layer hydrophone has a single PVDF layer of thickness of 25 μm .

NOTE The significance of absolute phase uncertainties has not become completely clear to date. For deconvolution procedures, both constant and linearly frequency-dependent phase shifts are irrelevant and a deviation of the "second order" is the value of interest.

I.2.4 Limitations

The TDS-based techniques can be applied to all common **hydrophones**. Using suitable sound sources, a sufficient signal-to-noise ratio is obtained. Since it is a secondary calibration method, a phase standard is required for absolute amplitude and phase calibration.

I.3 Pulse calibration technique with optical multilayer hydrophone

I.3.1 Principle of operation

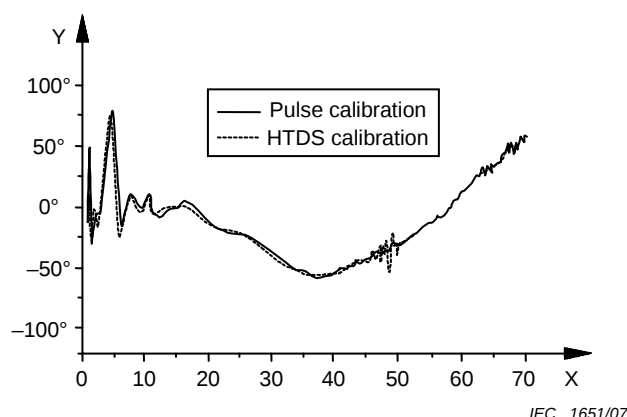
The TDS-based techniques provide sensitivity values only with respect to a reference. To obtain absolute values, a phase standard is required that is primary calibrated or whose phase is known *a priori*. An optical multilayer **hydrophone** has an excellent flat amplitude frequency response [70] which is expected to be accompanied by a just as flat phase response and the optical multilayer **hydrophone** is suitable for use as the required phase standard.

The optical multilayer **hydrophone** comprises a glass substrate covered with dielectric optical coatings [70, 71, 72]. These coatings form a micro-interferometer, the optical reflectance of which is very sensitive to changes in the thickness and optical index of the layers. If the sound wave hits the hydrophone, the sound pressure deforms the layers and the optical reflectance change is measured by a simple detection scheme consisting of a He-Ne laser, two lenses and a photodetector. The substrate is obliquely illuminated to match the optical resonance, i. e. the working wavelength of the sensor to the laser wavelength. Due to the finite thickness of the glass substrate, the time window for measurements not distorted by acoustic reflections from the rear side is limited, and short pulses should be used for sound excitation.

The optical multilayer **hydrophone** is excited by short ~~non-linearly~~ **nonlinearly** distorted sound wave pulses generated by a focusing transducer driven by a fast electrical pulse generator. The photodetector output voltage is proportional to the sound pressure and the signal can be acquired by a sampling oscilloscope and stored in a computer. An FFT procedure in the computer provides the frequency spectrum of the signal. The measurement is repeated under different matching conditions between the transducer and the generator, slightly shifting the fundamental and harmonic frequencies of the pulses to cover the complete frequency range of measurement with high signal strength. Note that both the fundamental and the harmonics are not narrow-band lines but broadband frequencies representing many spectral components. The frequency response is obtained by two measurements, the first with the optical **hydrophone** as the reference hydrophone and the second with the **hydrophone** to be calibrated.

I.3.2 Example of results

As an example, the phase of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm was determined by the pulse technique with the optical multilayer **hydrophone**. For comparison, the HTDS measurement using the same reference is also depicted.



Key

X f (MHz)
Y $\arg(M)$ (°)

Figure I.2 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for a Ø0,2 mm needle hydrophone

The dotted line represents results using the heterodyne time delay spectrometry (HTDS). The continuous line represents results using pulse calibration.

I.3.3 Uncertainties

An assessment of the uncertainties is impeded by the FFT procedure because many effects are disguised by the numerical procedure. The main contribution to the **uncertainty** assessment comes, as for the TDS techniques, however, from the determination of the distance between the **hydrophone** and the transducer, and the values are not very different from those given in Table I.1. Linear phase terms (although not relevant for the deconvolution procedures) can be minimized using a cross-correlation technique [72].

NOTE For the meaning of phase **uncertainty** values, see the Note at the end of I.2.3.

I.3.4 Limitations

Because of the finite thickness of the glass substrate, short pulses should be used for sound excitation of the optical multilayer **hydrophone**. This limits the application range at the low frequency side to about 500 kHz. To achieve high enough frequencies for deconvolution procedures, strongly focused ~~non-linear~~ **nonlinear** pulses are necessary, limiting the active diameter of the hydrophones to <0,5 mm. In combination with HTDS, a calibration service, however, can be established that covers the complete spectrum of common piezoelectric and optical **hydrophones**.

I.4 ~~Non-linear~~ **Nonlinear** pulse propagation modelling

I.4.1 Principle of operation

The techniques in Clauses I.2 and I.3 use the comparison with a known standard (or reference) device for determination of phase response. Alternatively, a known sound field can be applied as a reference that is predicted by a theoretical solution. It should, however, be ensured, in any way, that the experimental sound field agrees with the theoretical solution.

One possible realization is the use of ~~non-linear~~ **nonlinear** pulse propagation [73]. A single element transducer generates a short acoustic pulse focused on a long distance. During the

~~non-linear~~ **nonlinear** propagation, several harmonics are generated with a defined phase relation to the fundamental, which can be calculated by a theoretical model. If the relative phases of the harmonics are measured, a comparison to the model yields the phase response of the measurement system (not of the **hydrophone** alone).

I.4.2 Limitations

The pulse propagation technique yields the phase response of the complete detection line. Only if the responses of all other elements are known, the hydrophone phase response can be derived. A suitable sound propagation model should be used that should be carefully validated with respect to the experimental field to be applied to the **hydrophone**.

Annex J (informative)

Maximum size considerations for the active element of a hydrophone

J.1 Maximum hydrophone size in the near field case (Annex G – hydrophone position concept A)

If the near field hydrophone position concept according to Annex G is chosen, the maximum **hydrophone** radius is, in principle, only limited by the radius of the usable paraxial region in the sense of G.4.1. If, however, the recommended lateral displacement check shows amplitude variations, these should be less than ± 1 dB for a **hydrophone** displacement by an amount equal to the **effective hydrophone radius** in all lateral directions.

J.2 Maximum hydrophone size in the far field case (Annex G – hydrophone position concept B)

For an assessment, a simple approximation based on linear propagation in the **far field** of a plane-circular piston source can be given as

$$a_{\max} = \frac{cZ}{8fa_t} \quad (\text{J.1})$$

NOTE 1 Strictly, this formula applies only if $Z \gg a_t$ and $Z \ll 20fa_t^2/c$ (see [2]) but this is generally fulfilled in the measurements dealt with in this subclause.

NOTE 2 In [2] a theoretical correction procedure has been derived, to multiply the measured pressure amplitude by $(1 + \delta_{\text{av}})$ in order to obtain the true pressure amplitude, where δ_{av} is given by $\delta_{\text{av}} = [\pi a / (16a_{\max})]^2$ with $a_{\max}$ as in equation (J.1). This applies only to the reference **hydrophone** orientation, i.e. with the **hydrophone** surface perpendicular to the **beam axis**.

NOTE 3 Equation (J.1) may also be used in the case of hydrophone position concept D (see Annex G).

J.3 Maximum hydrophone size in the far field case with special reference to a long propagation path in order to achieve ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion (Annex G – hydrophone position concept C)

The temporal waveform at the field point used for the intercomparison consists of a number of harmonic frequencies. The pressure distribution of each of these needs to be sufficiently broad to ensure that spatial averaging over the **hydrophone** element does not degrade the provided calibration accuracy. With a prudent choice of transducer diameter and propagation distance, plane wave conditions over the effective receive aperture of the **hydrophone** may be approximated.

As the higher harmonics have beamwidths that progressively decrease with increasing frequency, spatial averaging will be more important at the upper frequency limit of the stated frequency band of the hydrophone, f_u . An estimate of the effect of spatial averaging may be made by considering the highest frequency harmonic beamwidth using a parameter γ , given by

$$\gamma = (-6 \text{ dB beamwidth of } f_u \text{ component}) / (\text{effective hydrophone diameter}) \quad (\text{J.2})$$

NOTE 1 The beamwidths referred to in the expression are measured values and, providing $\gamma > 2$, measured and actual (true) beamwidths may be considered to be equivalent. The condition of $\gamma = 2$ corresponds to a spatial averaging correction of 7,5 %.

A spatial averaging error of less than 3,5 % requires $\gamma > 3$. Reducing the permissible error to 2 % requires $\gamma > 4$ [74].

NOTE 2 The recommended maximum radius of the **hydrophone** is given by $a_{\max} = CZ / (8f a_t)$. Taking $Z = a_t^2 f / c$, this corresponds to a γ value of approximately 2,8.

Simple guidelines establishing the experimental conditions required to limit the effect of spatial averaging to this recommended level may be derived. Two assumptions are made during the analysis:

- the beamwidth of the fundamental frequency component under the ~~non-linear~~ **nonlinear** conditions used for the intercomparison is identical to that derived from linear propagation;

NOTE 3 Changes in the pressure distribution occur at progressively higher values of σ leading to a broadening of the beam profile of the individual harmonics [36]. The current analysis therefore represents a worst case scenario.

- the harmonic beamwidths are given by $w_f / \sqrt{n}$, where w_f is the beamwidth of the fundamental component and n is the harmonic number [75].

If f_f is the fundamental drive frequency of the signal used to generate ~~non-linear~~ **nonlinear** distortion and f_u is the upper frequency limit of the stated frequency band of the hydrophone for the calibration, then, assuming an ideal plane-piston transducer, an expression may be derived for $z_{\min}$, the minimum distance between the transducer and the **hydrophone** required to keep the effect of spatial averaging below the recommended level. The expression for $z_{\min}$, valid for large values of ka_t , is:

$$z_{\min} = 0,451 \gamma a_h k a_t \sqrt{\frac{f_u}{f_f}} \quad (\text{J.3})$$

where

a_h is the **effective hydrophone radius**;

$k = 2\pi f_f / c$ is the circular wave number;

a_t is the effective radius of the (transmitting) ultrasonic transducer.

This equation may be used to derive approximate values of $z_{\min}$, although due to ~~non-linear~~ **nonlinear** broadening, smaller distances might actually be used.

In any implementation of the concept bC method (see Annex G), the frequency content of the waveform should be investigated at various positions off-axis to verify the nature of the pressure distribution.

NOTE 4 Equation (J.3) can also be solved for a_h yielding the maximum **hydrophone** radius at a given distance Z .

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 (Ω)

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_{ref} must be reduced to make it equal to voltage U
a_{u1}	Factor by which the reference voltage U_{ref} must be reduced to make it equal to voltage U_1
a_{11}	Factor by which the reference voltage U_{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 hydrophone 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 hydrophone
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 hydrophone
M	Free-field sensitivity of a hydrophone
M^*	Apparent free-field sensitivity of a hydrophone , 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 hydrophone
r	Amplitude reflection coefficient for the reflector/water interface
s	{ = $(d_1 + d) \lambda/a_1^2$ } Normalized distance from auxiliary transducer to hydrophone
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 hydrophone
U_1	Open-circuit voltage for auxiliary transducer
U_{ref}	Reference voltage
v	Velocity of the radiating surface of the transducer
z	Distance along the acoustic axis from the transducer
α	Amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water)
λ	Ultrasonic wavelength
ρ	(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;

ρ 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° 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 λ 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° 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°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° 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_{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_{ref} , provided U_{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.

α' 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_{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_{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:

ρ 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 $p_{tr} = \rho c v$
- λ is the acoustic wavelength
- a_1 is the radius of the source, and
- α' 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_{11} 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_{11} 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_{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_{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:

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

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] BRENDDEL, 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] BRENDDEL, 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] BRENDDEL, 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.

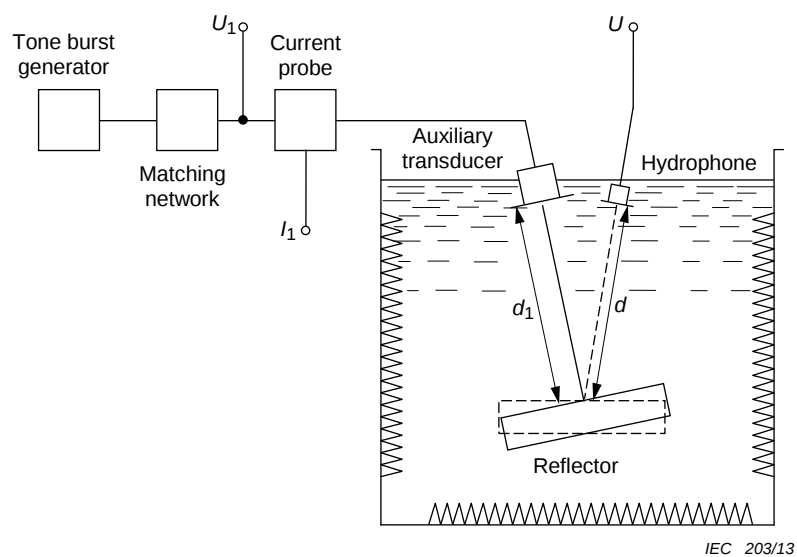


Figure K.1 – Experimental arrangement for the two-transducer reciprocity calibration method

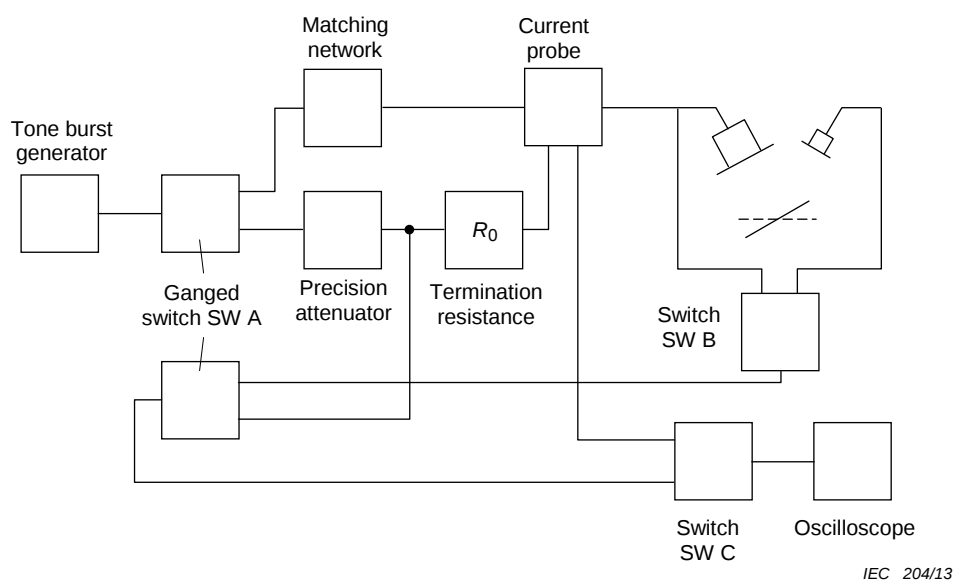


Figure K.2 – Block diagram of the electrical circuit for the two-transducer reciprocity calibration method.

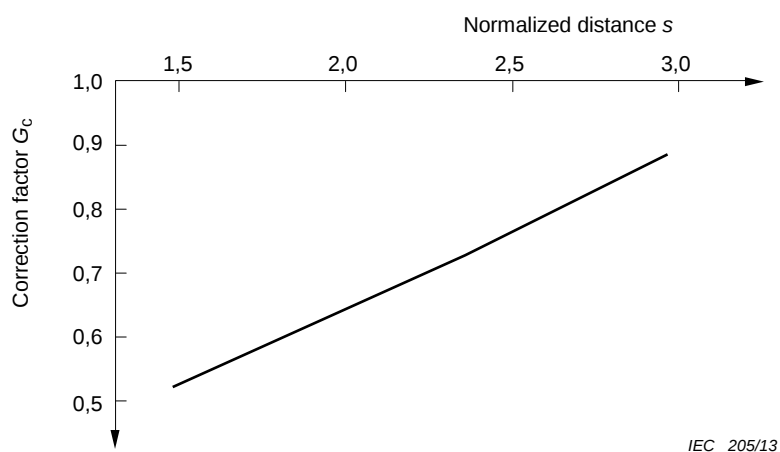


Figure K.3 – The value of the term G_c (part of the correction factor k) plotted as a function of the normalized distance.

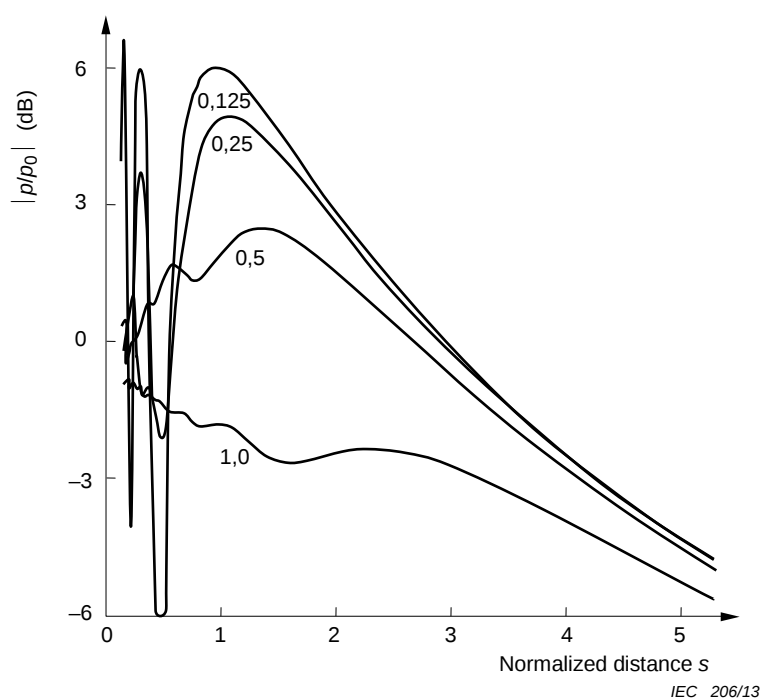


Figure K.4 – Average pressure plotted against normalized distance for transducers of different size. Parameter is the ratio receiver/transmitter diameter (according to reference [7] in Clause K.12)

Bibliography

- [1] HARRIS, GR. Are current hydrophone low frequency response standards acceptable for measuring mechanical/cavitation indices? *Ultrasonics*, 1996, vol. 34, iss. 6, p. 649-654.
- [2] BEISSNER, K. Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements. *Acustica*, 1985, vol. 59, p. 61-66.
- [3] ISO *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Geneva, Switzerland, 1995.
- [4] FAY, B., LEWIN, PA., LUDWIG, G., SESSLER, GM. and YANG, G. The influence of spatial polarization distribution on spot poled PVDF membrane hydrophone performance. *Ultrasound Med. Biol.*, 1992, vol. 18, no. 6-7, p. 625-635.
- [5] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A. and BERGER, WA. The influence of finite aperture and frequency response of ultrasonic hydrophone probes on the determination of acoustic output. *Ultrasonics*, April 2004, vol. 42, iss. 1-9, p. 367-372.
- [6] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., NOWICKI, A., and BERGER, WA. Hydrophones' effective diameter measurements as a quasi-continuous function of frequency. *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, iss. 8, p. 635-641.
- [7] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. Probing acoustic fields of clinically relevant transducers: the effect of hydrophone probes' finite apertures and bandwidths. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, October 2004, vol. 51, iss. 10, p. 1262-1270.
- [8] HARRIS, GR., GAMMELL, PA., RADULESCU, EGR. and LEWIN, PA. Interlaboratory evaluation of hydrophone sensitivity calibration from 0.1 to 2 MHz via time delay spectrometry. *Ultrasonics*, April 2004, vol. 42 iss. 1-9, p. 349-353.
- [9] BEISSNER, K. On the plane-wave approximation of acoustic intensity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 71, p. 1406–1411.
- [10] BEISSNER, K. Radiation force and force balances. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, p. 127-142.
- [11] FICK, SE. The NIST power reference source. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 6, p. 169-183.
- [12] BEYER, RT. *Nonlinear Acoustics*. U.S. Government Printing Office, 1975.
- [13] CARSTENSEN, EL. and MUIR, TG. The role of nonlinear acoustics in biomedical ultrasound. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 3, p. 57-79.
- [14] BJORNO, L. and LEWIN, PA. Measurement of B/A parameter in tissues. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 6, p. 141-163.
- [15] LEWIN, PA. Practical implementations and technology of measurement devices. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*: Boca Raton: CRC Press, 1992. Ch. 7, p. 185-215.
- [16] DUCK, FA. and MARTIN, K. Exposure values for medical devices. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 11, p. 315-344.

- [17] BACON, DR. Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, January 1982, vol. SU-29, no. 1, p. 18-25.
- [18] LEWIN, PA. Linearity of the polymer probes. *Proc. WFUMB*. Sydney. Elmsford, NY: Pergamon Press, 1985, p. 537.
- [19] KRAYNAK, T., SCHAFER, ME. and KRAKHMAN, V. Development of a cost-effective shock wave hydrophone. *1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1994, p. 1805-1808.
- [20] DODICK, JM. *Surgical instrument with input power transducer*. US Patent No. 5324282.
- [21] LEWIN, PA., BHATIA, R., ZHANG, Q., and DODICK, J. Characterization of optoacoustic surgical devices. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1995.
- [22] SCHAFER, ME. Techniques of hydrophone calibration. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exosimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 8, p. 217-255.
- [23] TRIER, HG. Ultrasonic devices for surgery (cataract removal and vitrectomy) in ophthalmology. *J. d'Echographie Med. Ultrasonore*, 1985, vol. 1, p. 17-23.
- [24] BEISSNER, K. Schallfelduntersuchungen an ophthalmologisch-chirurgischen Ultraschallgeraeten. In *Fortschritte d. Akustik – DAGA '80*. Berlin: VDE-Verlag, 1980, p. 567-570.
- [25] SCHAFER, ME. and BROADWIN, A. Acoustical characterization of ultrasonic surgical devices. *1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1994, p. 1903-1906.
- [26] MEEKS, S. and TING, R. The evaluation of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, vol. 75, p. 1010.
- [27] TANCRELL, RH., WILSON, DT. and RICKETTS, D. Properties of PVDF polymer for sonar. *1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1985, p. 624-627.
- [28] HERMAN, BA. and HARRIS, GR. Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, p. 1357-1363.
- [29] PINKERTON, JMM. The absorption of ultrasonic waves and liquids and its relation to molecular constitution. *Proc. Phys. Soc.*, 1949, vol. 62, p. 129-141.
- [30] CORBETT, SS. The influence of nonlinear fields on miniature hydrophone calibration using the planar scanning technique. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 162-167.
- [31] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., GOLDSTEIN, A. and NOWICKI, A. Hydrophone spatial averaging corrections from 1-40 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2001, vol. 48, iss. 6, p. 1575-1580.
- [32] RADULESCU, EG., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. 1-60 MHz Measurements in Focused Acoustic Fields using Spatial Averaging Corrections. *Ultrasonics*, May 2002, vol. 40, iss. 1-8, p. 497-501.
- [33] AIUM/NEMA. *Safety standard for diagnostic ultrasound equipment*. (AIUM/NEMA Standard Publication No. UL 1-1981). Laurel, MD: American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM); Rosslyn, VA: National Electrical Manufacturers Association (NEMA).
- [34] BACON, DR., A new method for ultrasonic hydrophone calibration. *1982 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1982, p. 700-704.

- [35] LOCKWOOD, JC., MUIR, TG. and BLACKSTOCK, DT. Directive harmonic generation in the radiation field of a circular piston. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1973, vol. 53, p. 1148-1153.
- [36] DEL GROSSO, VA. and MADER, CW. Speed of sound in pure water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972, vol. 52, p. 1442-1446.
- [37] BILANIUK, N. and WONG, GSK. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, vol. 93, p.2306.
- [38] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. Nonlinear propagation model for ultrasound hydrophones calibration in the frequency range up to 100 MHz. *Ultrasonics*, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 239-245.
- [39] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., WÓJCIK, J. and NOWICKI, A. Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves. *Ultrasonics*, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 247-254.
- [40] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. A new method of ultrasonic hydrophone calibration using KZK wave modeling. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 103 p. 2962.
- [41] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. A novel method for determining calibration and behavior of PVDF ultrasonic hydrophone probes in the frequency range up to 100 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1354-1362.
- [42] LEWIN, PA., UMCHID, S., SUTIN, A. and SARVAZYAN, A. Beyond 40 MHz frontier: the future technologies for calibration and sensing of acoustic fields. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2004, vol. 1, p. 38-43.
- [43] REIBOLD, R. and MOLKENSTRUCK, W. Investigation of pulse-excited hydrophones for ultrasonic field measurements using laser interferometry. *Ultrasonics*, March 1987, vol. 25, iss. 2, p. 114-118.
- [44] SCRUBY, CB. and DRAIN, LE. *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Bristol: Adam Hilger, 1990.
- [45] KOCH, Ch., LUDWIG, G. and MOLKENSTRUCK, W. Calibration of an interferometric fiber tip sensor for ultrasound detection. *Ultrasonics*, June 1997, vol. 35, iss. 4, p. 297-303.
- [46] KOCH, C. and MOLKENSTRUCK, W. Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, September 1999, vol. 46, iss. 5, p. 1303-1314.
- [47] BACON, DR. Primary calibration of ultrasonic hydrophone using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 152-161.
- [48] BACON, DR. and ROBINSON, SP. *Intercomparison of 1 mm hydrophone calibrations in the frequency range 0.5 to 15 MHz*. (Report EUR 13525 EN). Bureau Communautaire de Référence, Commission of the European Communities, 1991.
- [49] ROBINSON, SP., BACON, DR. and MOSS, BC. The measurement of the frequency response of a photodiode and amplifier using an opto-mechanical frequency response calibrator. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, vol. 1, p. 1184-1187.
- [50] ESWARD, TJ. and ROBINSON, SP. Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, May 1999, vol. 46, iss. 3, p. 737-744.
- [51] PRESTON, RC., BACON, DR., LIVETT, AJ. and RAJENDRAN, K. PVDF membrane hydrophone performance properties and their relevance to the measurement of the

- acoustic output of medical ultrasonic equipment. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1983, vol. 16, p. 786-796.
- [52] SMITH, RA. and BACON, DR. A multiple-frequency hydrophone calibration technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, p. 2231-2243.
 - [53] BACON, DR. Nonlinear acoustics in ultrasound calibration and standards. In HAMILTON, MF. and BLACKSTOCK, DT., eds., *Frontiers of nonlinear acoustics*. 12th ISNA. Elsevier, 1990, p. 3-19.
 - [54] HARRIS, GR. and SHOMBERT, DG. A pulsed near-field technique for measuring the directional characteristics of acoustic receivers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1985, vol. 32, no. 6, p. 802-808.
 - [55] LEWIN, PA. Calibration and performance evaluation of miniature ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry. *1981 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1981, p. 660-664.
 - [56] LUDWIG, G. and BRENDDEL, K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 168-174.
 - [57] BEYER, RT. Parameter of nonlinearity in fluids. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1960, vol. 32, p. 719-721.
 - [58] MUIR, TG. and CARSTENSEN, EL. Prediction of nonlinear acoustic effects at biomedical frequencies and intensities. *Ultrasound Med. Biol.*, 1980, vol. 6, no., 4, p. 345-357.
 - [59] SELFRIDGE, A. and LEWIN, PA. Wideband Spherically Focused PVDF Acoustic Sources for Calibration of Ultrasound Hydrophone Probes. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1372-1376.
 - [60] HARRIS, GR., CAROME, EF. and DARDY, HD. An analysis of pulsed ultrasonic fields as measured by PVDF spot-poled membrane hydrophones. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, September 1983, vol. SU-30, no. 5, p. 295-303.
 - [61] BABOUX, JC., LAKESTANI, F. and PERDRIX, M. Theoretical and experimental study of the contribution of radial modes to the pulsed ultrasonic field radiated by a thick piezoelectric disk. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, vol. 75, p. 1722-1731.
 - [62] HEYSER, RC. Acoustical measurements by time delay spectrometry. *J. Audio Eng. Soc.*, 1967, vol. 15, p. 370.
 - [63] PEDERSON, PC., LEWIN, PA. and BJORNO, L. Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 185-205.
 - [64] CHIVERS, RC. Time-delay spectrometry for ultrasonic transducer characterization. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1986, vol. 19, p. 834-843.
 - [65] GAMMELL, PM. Time and frequency domain measurements of materials with high ultrasonic attenuation using time domain spectroscopy. In THOMPSON, DO. and CHIMENTI, DE., eds, *Review of Progress in Quantitative NDE*. Plenum Press, 1986, vol. 5, p. 759-656.
 - [66] LEWIN, PA. Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes. *Ultrasonics*, September 1981, vol. 19, iss. 5, p. 213-216.
 - [67] LEWIN, PA. and SCHAFER, ME. Ultrasonic probes in measurement practice. *Medical Device and Diagnostic Industry*, 1986, vol. 8, no. 5, p. 40-45.

- [68] GAMMELL, PM. and HARRIS, GR. Time delay spectrometry for hydrophone calibrations below 1 MHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 106, L41-6.
- [69] KOCH, C. Amplitude and Phase Calibration of Hydrophones by Heterodyne and Time-gated Time-delay Spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 2003, vol. 50, iss. 3, p. 344-348.
- [70] WILKENS, V. Characterization of an optical multilayer hydrophone with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, vol. 113, p. 1431-38.
- [71] WILKENS, V. and KOCH, C. Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping. *Opt. Lett.*, 1999, vol. 24, no. 15, p. 1026-1028.
- [72] WILKENS, V. and KOCH, C. Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, p. 2892-2903.
- [73] HUMPHREY, VF., COOLING, MP., DUNCAN, TM. and DUCK, F. *Measurement of the phase response of a membrane hydrophone and its application to ultrasonic field characterisation*. Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine (AMUM) conference, Teddington, UK, 27-28 April 2004.
- [74] ZEQRIRI, B. and BOND, AD. The influence of waveform distortion on hydrophone spatial-averaging corrections – Theory and measurement. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, vol. 92, p. 1809-1821.

NOTE γ is referred to as α in [74].

- [75] DU, G. and BREAZEAL, MA. Harmonic distortion of a finite amplitude Gaussian beam in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, vol. 80, p. 212-216.
- [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

Related IEC documents

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

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

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	102
AVANT-PROPOS	105
INTRODUCTION.....	107
1 Domaine d'application.....	108
2 Références normatives	108
3 Termes, définitions et symboles	109
4 Liste des symboles	115
5 Présentation des modes opératoires d'étalonnage.....	118
5.1 Principes	118
5.2 Récapitulatif des modes opératoires d'étalonnage.....	119
5.3 Déclaration des résultats	120
5.4 Périodes d'étalonnage recommandées.....	122
6 Exigences génériques d'un système d'étalonnage d'hydrophone.....	122
6.1 Positionnement mécanique	122
6.1.1 Généralités	122
6.1.2 Précision de la position axiale de l'hydrophone	122
6.1.3 Précision de la position latérale de l'hydrophone	122
6.2 Mesures et stabilité de la température.....	123
6.3 Dimension de l'hydrophone	123
6.4 Récipient de mesure et propriétés de l'eau.....	123
6.5 Mesure de la tension de sortie	124
7 Considérations électriques.....	124
7.1 Type de signal	124
7.2 Mise à la masse	125
7.3 Mesure de la tension de sortie de l'hydrophone	125
7.3.1 Généralités	125
7.3.2 Charge électrique avec appareil de mesure.....	125
7.3.3 Charge électrique par rallonges de câble.....	125
7.3.4 Bruit	126
7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence) et interférence acoustique	126
7.3.6 Préamplificateurs d'hydrophone intégrés	126
8 Préparation des hydrophones.....	126
8.1 Généralités	126
8.2 Humidification.....	126
8.3 Support de l'hydrophone	127
8.4 Influence du câble	127
9 Etalonnage réciproque en champ libre	127
9.1 Généralités.....	127
9.2 Objet	127
9.3 Principes généraux.....	127
9.3.1 Généralités	127
9.3.2 Méthode d'étalonnage réciproque à trois transducteurs	128
9.3.3 Méthode d'étalonnage par auto-réciprocité	128
9.3.4 Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs	128

9.4	Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs	128
9.4.1	Appareils	128
9.4.2	Mode opératoire.....	128
10	Etalonnage en champ libre par exploration planaire.....	129
10.1	Généralités.....	129
10.2	Objet	129
10.3	Principe général	129
10.4	Exigences liées au mode opératoire.....	131
10.4.1	Balayage de l'hydrophone	131
10.5	Mode opératoire	131
10.5.1	Mesure de la puissance	131
10.5.2	Montage du transducteur	131
10.5.3	Conditions de mesure	131
10.5.4	Mesures	132
10.6	Corrections et sources d'incertitude	132
11	Etalonnage en champ libre par interférométrie optique	132
11.1	Généralités.....	132
11.2	Principe	132
12	Etalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé.....	132
12.1	Généralités.....	132
12.2	Objet	133
12.3	Principe	133
12.4	Exigences liées au mode opératoire.....	133
12.4.1	Transducteur source	133
12.4.2	Signal d'attaque du transducteur source	134
12.4.3	Système de mesure	134
12.5	Mode opératoire	134
12.5.1	Mesures (Type I): détermination de la réponse directionnelle d'un hydrophone	134
12.5.2	Mesures (Type II): étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé	135
12.6	Dimension maximale de l'hydrophone	135
Annexe A (informative) Evaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des hydrophones.....		136
Annexe B (informative) Comportement des capteurs polymères PVDF dans les champs ultrasoniques à haute intensité		139
Annexe C (informative) Corrections de charge électrique.....		143
Annexe D (informative) Etalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique d'exploration planaire		144
Annexe E (informative) Propriétés de l'eau		153
Annexe F (informative) Etalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique jusqu'à 40 MHz		155
Annexe G (informative) Concepts de forme d'onde		166
Annexe H (informative) Spectrométrie de temporisation – Exigences et brève présentation de la technique.....		176
Annexe I (informative) Détermination de la réponse en phase des hydrophones.....		179
Annexe J (informative) Considérations liées à la taille maximale de l'élément actif d'un hydrophone.....		185

Annexe K (informative) Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs.....	188
Bibliographie	204
Figure F.1 – Configuration expérimentale de la technique de la feuille interférométrique	158
Figure F.2 – Sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, M_C , d'un hydrophone à membrane coplanaire.....	160
Figure F.3 – Forme d'onde d'hydrophone générée par un hydrophone à membrane coplanaire de 9 μm placé au foyer d'un transducteur de 5 MHz (longueur focale de 51 mm)	161
Figure F.4 – Forme d'onde (déplacement) de l'interféromètre générée avec la pellicule placée au foyer du transducteur de 5 MHz (position focale de 51 mm)	162
Figure F.5 – Spectre de fréquences de la forme d'onde de déplacement (courbe inférieure) et forme d'onde de déplacement différenciée (courbe supérieure)	162
Figure F.6 – Sensibilité du diamètre d'un élément actif de 0,2 mm d'un hydrophone à membrane à deux feuilles de 9 μm déterminée à intervalles de 5 MHz dans la plage de fréquences comprise entre 5 MHz et 60 MHz	163
Figure G.1 – Coordonnées d'un point du champ, P, dans le champ proche d'un transducteur source circulaire plan de rayon a_t	173
Figure I.1 – Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de deux hydrophones à membrane	181
Figure I.2 – Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre	183
Figure K.1 – Configuration expérimentale pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.....	202
Figure K.2 – Organigramme du circuit électrique pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.....	202
Figure K.3 – Valeur du terme G_C (partie du facteur de correction k) tracée en fonction de la distance normalisée.....	203
Figure K.4 – Pression moyenne tracée en fonction de la distance normalisée pour des transducteurs de dimension différente. Le paramètre correspond au quotient de diamètre de récepteur/émetteur (selon la référence [7] en K.12)	203
Tableau 1 – Liste des valeurs d'incertitude typiques obtenues par les méthodes d'étalonnage spécifiées dans la présente norme et pour la plage de fréquences indiquée ici.....	120
Tableau E.1 – Vitesse du son c [36], [37] et impédance acoustique spécifique, ρc , en fonction de la température, pour la propagation dans l'eau.....	153
Tableau G.1 – Concepts de forme d'onde temporelle et de position de l'hydrophone décrits dans la présente annexe	166
Tableau I.1 – Exemple d'incertitudes (où un facteur de couverture $k = 2$ est utilisé) dans le cas de l'étalonnage de phase HTDS d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre, exprimé à un niveau de confiance de 95 %.....	181

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ULTRASONS – HYDROPHONES –

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

AVANT-PROPOS

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

Cette version consolidée de la CEI 62127-2 comprend la première édition (2007) [documents 87/353/CDV et 87/372/RVC], son amendement 1 (2013) [documents 87/519/FDIS et 87/527/RVD] et le corrigendum d'août 2008, (disponible en anglais seulement). Elle porte le numéro d'édition 1.1.

Le contenu technique de cette version consolidée est donc identique à celui de l'édition de base et à son amendement; cette version a été préparée par commodité pour l'utilisateur. Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par l'amendement 1. Les ajouts et les suppressions apparaissent en rouge, les suppressions sont barrées.

La Norme internationale CEI 62127-2 a été établie par le comité d'études 87 de la CEI: Ultrasons.

La CEI 62127-1, la CEI 62127-2 et la CEI 62127-3 ont été publiées conjointement. Ensemble, elles annulent et remplacent la CEI 60866:1987, la CEI 61101:1991, la CEI 61102:1991, la CEI 61220:1993 et la CEI 62092:2001.

La présente version bilingue (2012-06) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2007-08.

La version française n'a pas été soumise au vote.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62127, publiées sous le titre général *Ultrasons – Hydrophones*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

NOTE Les mots en **gras** dans le texte sont définis à l'Article 3.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements 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.

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

INTRODUCTION

La répartition spatiale et temporelle de la pression acoustique d'un champ à ultrasons en milieu liquide est généralement déterminée à l'aide d'**hydrophones** à ultrasons miniatures. Ces dispositifs ne sont pas des appareils de mesure à proprement parler et nécessitent un étalonnage. La présente partie de la CEI 62127 a pour objet de spécifier les méthodes d'étalonnage à utiliser pour déterminer la réponse d'un **hydrophone** dans la gamme ultrasonore, c'est-à-dire au-dessus de 20 kHz et jusqu'à une fréquence de 40 MHz. Dans ce cadre, la principale application de l'**hydrophone** consiste à mesurer les champs ultrasoniques émis par des appareils de diagnostic médical dans l'eau. Le comportement de l'**hydrophone** dans cette large bande de fréquences est nécessaire pour caractériser de manière fiable les paramètres acoustiques du champ acoustique appliqué. En particulier, la plage de fréquences au-dessus de 15 MHz est importante pour caractériser cet appareil de manière exhaustive, principalement en raison de la présence accrue de composants à haute fréquence dans les signaux ultrasonores provoqués suite à une propagation non linéaire. En outre, les systèmes médicaux à ultrasons utilisant des fréquences supérieures à 15 MHz sont de plus en plus nombreux, notamment les sondes péri-opératoire. Ces dernières années, il est apparu que les réponses d'un **hydrophone** inférieures à 0,5 MHz sont également nécessaires pour déterminer avec fiabilité la pression acoustique négative (de raréfaction) de crête.

Si le terme "**hydrophone**" peut être utilisé dans un sens plus large, il fait référence ici aux **hydrophones** piézoélectriques miniatures. Il s'agit d'un type d'appareil utilisé aujourd'hui dans différents domaines des ultrasons médicaux et, en particulier, pour caractériser de manière quantitative la structure du champ des appareils de diagnostic médicaux. Concernant d'autres types de capteur de pression (ceux reposant sur les fibres optiques, par exemple), certaines exigences de la présente norme leur sont également applicables, mais d'autres pas. Si, à l'avenir, ces autres types d'"**hydrophone**" prennent de l'importance dans la pratique de mesure de champ, leurs caractéristiques et leur étalonnage devront faire l'objet d'une version révisée de la présente norme ou d'une norme distincte.

NOTE La présente norme porte sur la plage de fréquences ultrasonores comprise entre 20 kHz et une fréquence supérieure de 40 MHz. Les normes traitant des propriétés de l'**hydrophone** (CEI 62127-3) et de l'utilisation de l'**hydrophone** (CEI 62127-1) sont développées en parallèle dans le cadre d'un programme d'activités de maintenance visant à restructurer et fusionner, dans la mesure du possible, toutes les normes existantes relatives aux **hydrophones** à ultrasons. Cela sera éventuellement à l'origine de normes unifiées couvrant l'ensemble du domaine d'application pratique de l'**hydrophone**.

ULTRASONS – HYDROPHONES –

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

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62127 spécifie:

- les méthodes d'étalonnage absolues de l'**hydrophone**;
- les méthodes d'étalonnage (comparatives) relatives de l'**hydrophone**.

Des recommandations et références à des documents validés sont faites pour les méthodes d'étalonnage relatives et absolues dans la plage de fréquences couverte par la présente norme.

Cette norme s'applique aux

- **hydrophones** utilisés pour procéder à des mesures dans l'eau dans la plage de fréquences ultrasonores pouvant atteindre 40 MHz;

NOTE 1 Bien que certaines applications des ultrasons appliquées en physiothérapie fonctionnant dans la plage de fréquences comprise entre 40 kHz et 100 kHz soient en cours de développement, la plage de fréquences principale des appareils d'imagerie de diagnostic reste supérieure à 2 MHz. Il a récemment été établi que, même dans ce dernier cas, la réponse de l'**hydrophone** à des fréquences sensiblement inférieures peut influencer les mesures réalisées des paramètres acoustiques fondamentaux [1].

- **hydrophones** utilisant des capteurs piézoélectriques circulaires, conçus pour mesurer les champs ultrasoniques à ondes pulsées et entretenues générés par les appareils à ultrasons;

NOTE 2 Certains hydrophones peuvent comporter des éléments actifs non circulaires, suite à des écarts sensibles de la structure circulaire provoqués, par exemple, par une structure à électrode. A l'inverse, les éléments actifs peuvent réellement être carrés. Les articles de la présente norme restent valables même si, dans certains cas, il convient d'accorder une attention particulière à la réponse directionnelle et aux rayons efficaces de l'élément actif passant par différents axes de rotation.

- **hydrophones** avec ou sans préamplificateur d'hydrophone.

2 Références normatives

Les documents référencés ci-dessous sont indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition mentionnée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence (y compris ses amendements) s'applique.

CEI 60050-801:~~1994~~, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

CEI 60565, *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Etalonnage dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à 1 MHz*

CEI 61161:~~2006~~, *Ultrasons – Mesurage de puissance – Balances de forces de rayonnement et exigences de fonctionnement*

CEI 61828:~~2006~~, *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

CEI 62127-3, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 3: Propriétés des hydrophones pour les champs ultrasoniques jusqu'à 40 MHz*

3 Termes, définitions et symboles

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 62127-1 ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

centre acoustique

point du transducteur ou à proximité de celui-ci à partir duquel les ondes sonores divergentes sphériques émises par le transducteur, et qui peuvent être observées en des points distants, divergent

3.2

axe du faisceau

ligne droite passant par les points centraux d'un faisceau de deux plans perpendiculaires à la droite associant le point de l'intégrale de pression d'impulsion au carré maximal au centre de l'ouverture du transducteur externe

NOTE 1 L'emplacement du premier plan est celui du plan contenant l'**intégrale de pression d'impulsion au carré** maximal, ou, en variante, celui contenant un seul lobe principal se trouvant dans la zone Fraunhofer focale. L'emplacement du second plan est, dans la mesure du possible, issu du premier plan et parallèle au premier avec les deux mêmes lignes de balayage orthogonales (axes x et y) utilisées pour le premier plan.

NOTE 2 Dans un certain nombre de cas, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée dans la définition ci-dessus par une grandeur associée de manière linéaire, par exemple:

- a) dans le cas d'un signal à ondes entretenues, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée par la pression acoustique carrée moyenne telle que définie dans la CEI 61689,
- b) si la synchronisation du signal avec cadre de balayage n'est pas disponible, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** peut être remplacée par l'**intensité moyenne temporelle**.

NOTE 3 Voir Figure 1 de la CEI 62127-1.

NOTE 4 Définition de la CEI 62127-1.

3.3

point central d'un faisceau

position déterminée par l'intersection de deux droites passant par les **points médians du faisceau** de deux plans orthogonaux, xz et yz

NOTE Définition de la CEI 61828:2001.

3.4

largeur de faisceau

w_6, w_{12}, w_{20}

distance la plus importante entre deux points d'un axe spécifié perpendiculaire à l'**axe d'alignement du faisceau**, où l'**intégrale de pression d'impulsion au carré** est inférieure à sa valeur maximale sur l'axe spécifié par une grandeur donnée

NOTE 1 Dans un certain nombre de cas, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée dans la définition ci-dessus par une grandeur associée de manière linéaire, par exemple:

- a) dans le cas d'un signal à ondes entretenues, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée par la pression acoustique carrée moyenne telle que définie dans la CEI 61689,

- b) si la synchronisation du signal avec cadre de balayage n'est pas disponible, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** peut être remplacée par l'**intensité moyenne temporelle**.

NOTE 2 Les **largeurs de faisceau** communément utilisées sont spécifiées à des niveaux 6 dB, –12 dB et –20 dB en dessous de la valeur maximale. Le calcul de décibel implique l'utilisation de 10 fois le logarithme des rapports des intégrales.

NOTE 3 La **largeur de faisceau** est exprimée en mètres (m).

NOTE 4 Définition de la CEI 62127-1.

3.5

point médian d'un faisceau

moyenne linéaire de l'emplacement des centres des **largeurs de faisceau** d'un plan

NOTE 1 La moyenne est calculée sur 20 niveaux de largeur de faisceau correspondant à des intervalles dans la plage comprise entre –0,1 dB et –26 dB (voir l'Article B.2 de la CEI 61828).

NOTE 2 Définition de la CEI 61828:2001.

3.6

centre du faisceau

point d'un plan dans le **champ lointain**, en général perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, auquel la **pression acoustique à la crête spatiale et temporelle** se produit

3.7

balayage diamétral de faisceau

ensemble de mesures de la tension de sortie de l'hydrophone réalisées lors du déplacement de l'hydrophone dans une ligne droite passant par un point de l'axe du faisceau et dans une direction perpendiculaire à l'axe du faisceau

NOTE 1 Le **balayage diamétral de faisceau** peut être étendu à différentes distances sur l'un ou l'autre des côtés de l'**axe du faisceau**.

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-1.

3.8

réponse directionnelle

description, généralement présentée de manière graphique, de la réponse d'un **hydrophone**, en fonction de la direction de propagation de l'onde sonore incidente plane, dans un plan spécifié passant par le **centre de référence** et à une fréquence spécifiée

NOTE Définition de la CEI 60565.

3.9

rayon efficace d'un transducteur ultrasonique ~~non focalisé sans focalisation~~

a_t

rayon d'un transducteur à source ultrasonique semblable à un piston à disque parfait présentant une répartition de la pression acoustique axiale prévue pratiquement équivalente à celle observée sur une distance axiale tant que le dernier maximum axial au moins n'est pas passé

NOTE 1 Le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique** ~~non focalisé sans focalisation~~ est exprimé en mètres (m).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-1.

3.10

rayon efficace de l'hydrophone

a_h , a_{h3} , a_{h6}

rayon d'un **hydrophone** de récepteur à disque tendu doté d'une fonction de **réponse directionnelle** prévue à angle d'ouverture égal à l'angle d'ouverture observé

NOTE 1 L'angle d'ouverture est déterminé à un niveau spécifié inférieur à la crête de la fonction de **réponse directionnelle**. Pour les niveaux spécifiés de 3 dB et 6 dB, les rayons sont respectivement indiqués par a_{h3} et a_{h6} .

NOTE 2 Le **rayon efficace de l'hydrophone** est exprimé en mètres (m).

NOTE 3 D'une manière générale, le rayon est une fonction de la fréquence. Pour obtenir des données expérimentales représentatives, voir [2].

NOTE 4 Définition de la CEI 62127-3.

3.11

impédance de charge électrique

Z_L

impédance d'entrée électrique complexe (composée d'une partie réelle et d'une partie imaginaire) à laquelle le câble de sortie de l'**ensemble d'hydrophones** est ou doit être connecté

NOTE 1 L'**impédance de charge électrique** est exprimée en ohms (Ω).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.12

sensibilité en bout de câble

sensibilité en bout de câble de l'hydrophone (ou d'un ensemble d'hydrophones)

$M_L(f)$

quotient de la tension instantanée à l'extrémité d'un câble intégré ou connecteur de sortie faisant partie d'un **hydrophone** ou d'un **ensemble d'hydrophones**, relié à une **impédance électrique d'entrée** spécifiée, par la **pression acoustique instantanée** du champ libre non perturbé d'une onde plane présente à la position du centre de référence de l'**hydrophone**, celui-ci ayant été retiré

NOTE 1 La **sensibilité en bout de câble** est exprimée en volts par pascal (V/Pa).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.13

sensibilité en circuit ouvert de l'embout de câble

sensibilité en circuit ouvert de l'embout de câble d'un hydrophone

$M_c(f)$

quotient de la tension instantanée en circuit ouvert à l'extrémité d'un câble intégré ou d'un connecteur de sortie d'un **hydrophone** sur la **pression acoustique instantanée** dans le champ libre non perturbé d'une onde plane dans la position du **centre de référence** de l'**hydrophone**, si ce dernier a été retiré

NOTE La **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** est exprimée en volts par pascal (V/Pa).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.14

ouverture du transducteur externe

partie de la surface du **transducteur ultrasonique** ou du **groupe d'éléments transducteurs ultrasoniques** émettant des rayonnements ultrasoniques dans le milieu de propagation

NOTE 1 Cette surface est en contact direct avec le patient ou en contact avec un parcours de l'eau ou de liquide vers le patient (voir Figure-2 1 de la CEI 62127-1).

NOTE 2 Définition de la CEI 61828:2001.

3.15

champ lointain

~~champ acoustique (sonore) à une distance du transducteur ultrasonique où les valeurs de la pression acoustique instantanée et la vitesse acoustique sont pratiquement en phase (voir~~

~~également la CEI 60050-801, 801-23-30)~~ région du champ où $z > z_T$ est alignée sur l'axe du faisceau pour des transducteurs plans sans focalisation

NOTE 1 Dans le **champ lointain**, la pression acoustique semble présenter une divergence sphérique par rapport à un point de la surface émettrice ou à proximité de celle-ci. En conséquence, la pression générée par la source sonore est environ inversement proportionnelle à la distance à partir de la source.

NOTE 2 L'expression "**champ lointain**" est utilisée dans la présente norme uniquement en relation avec les transducteurs à source non focalisée. Pour les transducteurs focalisés, une terminologie différente est utilisée pour les diverses parties du champ transmis (voir CEI 61828).

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]

3.16

champ libre

champ acoustique en milieu homogène et isotrope dans lequel les effets des limites sont négligeables

NOTE Définition de la CEI 60565: 2006, 3.13.

3.17

hydrophone

transducteur produisant des signaux électriques en réponse à des signaux acoustiques aquatiques

NOTE Définition de la CEI 60050-801, 801-32-26.

3.18

ensemble d'hydrophones

combinaison d'un **hydrophone** et d'un **préamplificateur d'hydrophone**

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.19

axe de l'hydrophone

axe de symétrie nominal de l'élément actif de l'**hydrophone**

NOTE 1 Sauf indication contraire (explicite et quantitative) du fabricant, il est entendu pour les besoins de la présente norme qu'il est donné par l'axe de symétrie géométrique apparent de l'**hydrophone**.

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.20

rayon géométrique de l'hydrophone

rayon géométrique d'un élément actif de l'**hydrophone**

a_g

rayon défini par les dimensions de l'élément actif d'un **hydrophone**

NOTE 1 Le **rayon géométrique de l'hydrophone** est exprimé en mètres (m).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-3.

3.21

préamplificateur de l'hydrophone

dispositif électronique actif connecté ou à connecter à un hydrophone particulier et permettant de réduire son impédance de sortie

NOTE 1 Le **préamplificateur de l'hydrophone** requiert une/des tension(s) d'alimentation.

NOTE 2 Le **préamplificateur de l'hydrophone** peut faire l'objet d'un facteur de transmission de la tension directe inférieur à un, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire qu'il s'agisse d'un amplificateur de tension stricto sensu.

NOTE 3 Définition de la CEI 62127-3.

3.22

pression acoustique instantanée

$p(t)$

en un point donné du champ acoustique, différence entre la pression existante à un instant donné et la pression ambiante (voir également CEI 60050-801, 801-21-19)

NOTE 1 La **pression acoustique instantanée** est exprimée en pascals (Pa).

NOTE 2 Définition de la CEI 62127-1.

3.23

intensité instantanée

$I(t)$

énergie acoustique transmise par unité de temps dans la direction de propagation de l'onde acoustique par unité de masse perpendiculaire à cette direction à un instant et un point donnés dans un champ acoustique

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 ~~plage~~ **gamme** de fréquences ultrasoniques. Pour les besoins des mesures auxquelles fait référence la présente Norme internationale, ~~et s'il est raisonnable de supposer les conditions en champ lointain~~ 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** ~~est~~ peut être approchée par ~~l'équation suivante~~: l'**intensité instantanée dérivée**.

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

où

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

ρ est la **densité du milieu**;

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

NOTE 2 L'**intensité instantanée** est exprimée en watts par mètres carrés (W/m^2).

3.24

centre de référence

point de l'**hydrophone** ou à proximité de celui-ci auquel la sensibilité de réception acoustique est définie

NOTE Sauf indication contraire (explicite et quantitative) du fabricant, il est entendu pour les besoins de la présente norme qu'il est donné par le centre géométrique de la surface frontale de l'**élément actif** de l'**hydrophone**.

(Voir CEI 60565: 2006, 3.25)

3.25

incertitude

paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées à un mesurande

NOTE Voir ISO Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure [3], 2.2.3

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**; ρ 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/m²).

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

3.27**longueur d'onde effective** λ

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 π fois la **longueur d'onde effective**, λ ;
- b) pour les mesures: la **distance de transition** est la surface équivalente de la **largeur d'ouverture source** divisée par π 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 πa^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

a_h rayon efficace de l'hydrophone (a_{h3} , a_{h6} : avec référence spéciale à une

	définition 3 dB ou 6 dB, respectivement)
a_g	rayon géométrique de l'hydrophone
$a_{\max}$	rayon efficace maximal pour une application particulière de l'hydrophone
a_p	distance latérale à partir de l'axe du faisceau ($a_{p\max E}$, $a_{p\max H}$: valeurs maximales permettant d'éviter les interférences entre l'onde de bord et l'onde réfractée, respectivement)
a_t	rayon efficace d'un transducteur ultrasonique—non focalisé sans focalisation
A_g	surface géométrique d'un transducteur ultrasonique
B/A	paramètre de non-linéarité de Fox-Wallace
c	vitesse du son dans un milieu (en principe de l'eau)
C_H	capacité électrique en bout de câble de l'hydrophone, y compris le câble intégré et le connecteur
$D(\theta)$	fonction de la réponse directionnelle normalisée
e	base des logarithmes naturels
f	fréquence
f_f	fréquence de commande fondamentale d'un signal utilisée pour générer une déformation non linéaire
f_u	limite de fréquence supérieure de la bande de fréquences indiquée d'un hydrophone
I_p	amplitude de l'intensité instantanée supposée proportionnelle à la pression acoustique au carré
$\vec{I}(x,y,z,t)$	vecteur d'intensité instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
$I(x,y,z,t)$	composante du vecteur d'intensité instantanée dans la direction de propagation au point (x,y,z) à l'instant t
F	longueur focale géométrique d'un transducteur à focalisation
$j_{\max}$	numéro du point de balayage le plus éloigné d'un balayage radial
k	nombre d'ondes circulaires ($= 2\pi/\lambda$)
L_{SA}	largeur d'ouverture source
L_{TA}	largeur d'ouverture du transducteur
$\underline{M}$	symbole général de la sensibilité complexe de l'hydrophone, $M = \underline{M} $ étant son module et $\arg(\underline{M})$ étant son argument (= angle de phase)
$M_c(f)$	sensibilité en circuit ouvert en bout de câble
$M_L(f)$	sensibilité en bout de câble
N_{av}	nombre de moyennes de forme d'onde calculées pour générer une forme d'onde de la moyenne temporelle des tensions
N	nombre d'échantillons diamétraux
N_{harm}	rang d'un harmonique
p_0	amplitude de la pression
p_1	amplitude de la pression acoustique au niveau de la face d'un transducteur
$p(x,y,z,t)$	pression acoustique instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
$P(l)$	puissance acoustique totale passant par un plan d'étendue infinie dans un champ acoustique à une distance l d'un transducteur ultrasonique
P_0	puissance acoustique totale émise par un transducteur
rf	signaux radioélectriques
r	distance entre le centre du faisceau acoustique et un point de balayage
R	$(l/\pi a_1^2)$ - distance normalisée entre un transducteur et un hydrophone en termes de distance Rayleigh ($\pi a_1^2/\lambda$)
R_{1i}, R_{2i}	distances entre le centre du faisceau et les extrêmes du i -ième balayage

	diamétral de faisceau
s	distance entre le centre du faisceau acoustique et le point de balayage le plus proche
t_H	instant d'arrivée de l'onde réfractée la plus proche
t_{TDS}	instant disponible d'une mesure en champ libre en spectrométrie de temporisation
TF	facteur de transmission acoustique
$U_L(x,y,z,t)$	tension en bout de câble d'un hydrophone placé au point de référence (x,y,z) à l'instant t
$U_L'(x,y,z,t)$	tension en bout de câble d'un hydrophone, y compris le bruit avec l'hydrophone placé au point de référence (x,y,z) à l'instant t
$U_n(x,y,z)$	niveau de bruit efficace mesuré avec un hydrophone au point de référence (x,y,z)
U_T	tension au niveau des bornes d'un transducteur ultrasonique
$\vec{v}(x,y,z,t)$	vecteur de vitesse acoustique instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
v_t	vitesse d'une onde radiale dans une plaque du transducteur
w_f	largeur de faisceau du composant du champ de fréquence fondamentale
z	distance axiale entre un hydrophone et la surface d'un transducteur ultrasonique. (z_1, z_2, z_3 et z_4 sont des valeurs de distance particulières reposant sur certains critères impliquant des ondes de bord et des ondes réfractées)
$z_{\min}$	distance minimale entre un hydrophone de taille finie et un transducteur
z_{pf}	distance entre le foyer de pression et un transducteur à focalisation
z_T	distance de transition
Δz	différence de distance
$\underline{Z}_h$	impédance de sortie électrique complexe d'un hydrophone
$\underline{Z}_L$	impédance de charge électrique complexe
α	coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes planes dans un milieu (en principe de l'eau)
β	paramètre de non-linéarité dans le sens de l'équation $\beta = 1 + B/(2A)$
δ	amplitude de la seconde harmonique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la pression acoustique à la fréquence fondamentale
δ_{av}	correction de l'amplitude de la pression pour une dimension finie de l'hydrophone
θ	angle entre la direction de propagation des ultrasons et l'axe z , équivalent à l'angle entre la droite reliant le centre du transducteur ultrasonique au centre de l'hydrophone et la direction de propagation
θ_1	angle entre la droite reliant le centre du transducteur ultrasonique au centre de l'hydrophone et la direction de la sensibilité maximale de l'hydrophone
γ	quotient du rayon du faisceau sur le rayon efficace de l'hydrophone
ζ	déplacement acoustique mesuré par un interféromètre optique
θ	angle d'incidence d'une onde ultrasonore par rapport à l'axe de l'hydrophone (θ_3, θ_6 avec référence spéciale à des niveaux définis à 3 dB et 6 dB)
λ	longueur d'onde ultrasonore
λ_1	longueur d'onde optique
ξ	$\pi/2$ instants de la longueur Rayleigh (a_t^2/λ , voir la CEI 61828) d'un transducteur à focalisation
ρ	(masse) densité du liquide de mesure (eau)
ρc	impédance acoustique spécifique

σ	paramètre de déformation non linéaire
σ_m	paramètre de propagation non linéaire
τ	durée d'impulsion ou de giclée ($\tau_{\max E}$, $\tau_{\max H}$: valeurs maximales permettant d'éviter les interférences entre l'onde de bord et l'onde réfractée, respectivement)
ω	fréquence circulaire

5 Présentation des modes opératoires d'étalonnage

5.1 Principes

Les **hydrophones** sont nécessaires aux mesures absolues des propriétés d'un champ acoustique. La tension de sortie en fonction du temps d'un **hydrophone**, $u(t)$, peut être représentée par:

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad (2)$$

où

$p(t)$ est la forme d'onde de pression;

$*$ est une convolution;

$m(t)$ est la réponse impulsionnelle de l'**hydrophone**.

Utilisé dans le domaine de Fourier, si $U(f)$, $P(f)$ et $M(f)$ sont les transformées de Fourier respectives, le spectre de tension, $U(f)$, qui en résulte est égal à $P(f) \times M(f)$. La grandeur $M(f)$ est la fonction de transfert de l'**hydrophone** (sensibilité) et sa valeur complexe est composée d'éléments réels et imaginaires.

En accord avec la présente pratique de mesure, les **hydrophones** sont considérés dans cette norme comme des capteurs d'amplitude et non comme des capteurs de phase. Toutefois, certains éléments montrent l'importance de cette mesure de phase à l'avenir, notamment en raison de l'application des méthodes de déconvolution (voir la CEI 62127-1), qui nécessitent la fonction de transfert complexe de l'hydrophone. Si les mesures de phase s'avèrent effectivement importantes, la présente norme devra faire l'objet d'une révision et prévoir des exigences plus strictes pour ce type de mesure. Un récapitulatif des possibilités réelles de mesure de phase (relatives) est proposé à l'Annexe I.

NOTE 1 En conséquence, tout au long de la présente norme, la sensibilité de l'**hydrophone** est considérée comme une véritable grandeur (exprimant le rapport des amplitudes).

Les modes opératoires d'étalonnage des **hydrophones** sont spécifiés selon les principes ci-dessous:

a) étalonnage à l'aide d'un transducteur normalisé.

Un **hydrophone** peut être étalonné en fonction d'un transducteur normalisé utilisé comme source de puissance acoustique. La puissance de sortie du transducteur doit être déterminée à l'aide des techniques de balance à force de radiation selon la CEI 61161;

b) étalonnage sans l'aide d'un transducteur normalisé.

Ce type d'étalonnage couvre:

1) l'étalonnage réciproque

Étalonnage reposant sur le principe de réciprocité, dans lequel au moins un transducteur est un transducteur réciproque;

2) l'étalonnage physique

Étalonnage dans lequel la pression acoustique au niveau de l'**hydrophone** est calculée à partir de la mesure d'un paramètre physique lié au champ acoustique, comme le déplacement acoustique (par exemple: interférométrie optique).

NOTE 2 L'étalonnage "absolu" de l'**hydrophone** s'entend ici dans le sens de "sans référence à un autre **hydrophone**". Il est parfois également appelé mode opératoire "principal". Par ailleurs, dans la pratique, les **hydrophones** sont souvent étalonnés suivant un mode opératoire "secondaire" ou "de substitution", ce qui implique une comparaison de sensibilité avec un **hydrophone** de référence étalonné. L'**hydrophone** de référence lui-même a été étalonné en termes "absolus" ou par rapport à un autre **hydrophone** de référence, et ainsi de suite. De toute évidence, il existe deux modes opératoires fondamentaux différents: l'un permettant de réaliser un étalonnage absolu de l'**hydrophone** et l'autre de comparer la sensibilité de deux **hydrophones**. Les Articles 9, 10, 11, ainsi que les Annexes D, F et H traitent du premier mode opératoire. Le dernier mode opératoire est présenté en détail dans l'Article 12. Il convient de noter qu'un étalonnage de substitution implique en général les deux étapes, et que l'utilisateur intéressé se reporte à l'Article 12 et à d'autres articles couvrant l'étalonnage absolu (et que les **incertitudes** liées aux deux étapes fondamentales contribuent à l'**incertitude** de l'étalonnage final en cas d'étalonnage de substitution).

5.2 Récapitulatif des modes opératoires d'étalonnage

Les plages de fréquences appropriées des différentes méthodes qu'il est possible d'utiliser pour étalonner des **hydrophones** à ultrasons sont données ci-après, avec une référence à l'article qui précise la méthode pertinente. Le Tableau 1 propose une tabulation de l'**incertitude** d'étalonnage typique qu'il est possible d'atteindre.

- | | |
|--|------------|
| a) Etalonnage réciproque en champ libre | Article 9 |
| – Etalonnage sans transducteur normalisé dans un champ libre , entre 50 kHz et 15 MHz. | |
| b) Etalonnage en champ libre par exploration planaire | Article 10 |
| – Etalonnage avec un transducteur normalisé dans un champ libre , entre 500 kHz et 15 MHz. | |
| c) Etalonnage en champ libre par interférométrie optique | Article 11 |
| – Etalonnage physique réalisé par mesure en champ libre du déplacement acoustique, entre 200 kHz et 40 MHz. | |
| d) Etalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé | Article 12 |
| – Etalonnage par comparaison avec un hydrophone normalisé étalonné, entre 50 kHz et 40 MHz. | |

Tableau 1 – Liste des valeurs d'incertitude typiques obtenues par les méthodes d'étalonnage spécifiées dans la présente norme et pour la plage de fréquences indiquée ici

Article	Méthode	Plage de fréquences	Incertitude
9	Etalonnage réciproque à deux transducteurs (9.3.4)	1 MHz à 2 MHz	6 %
		jusqu'à 10 MHz	10 %
		jusqu'à 15 MHz	16 %
	Etalonnage réciproque à trois transducteurs (9.3.2)	de 50 kHz à 100 kHz	5 %
		jusqu'à 500 kHz	6 %
		jusqu'à 1 MHz	10 %
10	Etalonnage en champ libre par exploration planaire (Annexe D)	de 500 kHz à 10 MHz	6 %
		jusqu'à 15 MHz	18 %
11	Etalonnage en champ libre par interférométrie optique (Annexe F)	de 200 kHz ^a à 1 MHz	7 %
		jusqu'à 10 MHz	7 %
		jusqu'à 20 MHz	8 %
		jusqu'à 30 MHz	10 %
		jusqu'à 40 MHz	11 %
12	Etalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé (12.5.2) (Annexe G, Annexe H)	de 50 kHz à 200 kHz	9 %
		jusqu'à 1 MHz	8 %
		jusqu'à 10 MHz	7 %
		jusqu'à 20 MHz	11 %
		jusqu'à 30 MHz	12 %
		jusqu'à 40 MHz	12 %

^a Il convient de ne pas prendre la plage de fréquences inférieure de 200 kHz comme la limite inférieure à laquelle les étalonnages peuvent être réalisés par interférométrie optique. Cette limite inférieure est en général contrôlée par les réflexions provenant des réservoirs d'eau ou du dispositif en cours d'étalonnage.

5.3 Déclaration des résultats

La sensibilité en bout de câble de l'**ensemble d'hydrophones** doit être indiquée en V/Pa ou en sous-multiples décimaux ou sous la forme d'un niveau logarithmique en dB en référence à la valeur de sensibilité indiquée. Il doit être précisé si la valeur de sensibilité indiquée est la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** ou la **sensibilité en bout de câble**. Dans ce dernier cas, les conditions de charge électrique correspondantes, c'est-à-dire l'**impédance de charge électrique**, doivent être indiquées afin d'obtenir la sensibilité indiquée.

NOTE 1 L'expression "en bout de câble" fait référence à l'extrémité du câble de sortie de l'**ensemble d'hydrophones**, avec ou sans **préamplificateur de l'hydrophone**.

L'**incertitude** de la sensibilité indiquée doit être donnée. Si la sensibilité est donnée pour un intervalle de fréquence, l'**incertitude** doit l'être pour exactement le même intervalle. Si la sensibilité est donnée pour un certain nombre de points de fréquence, il convient de donner l'**incertitude** pour des intervalles de fréquences susceptibles d'aider l'utilisateur.

NOTE 2 Des informations sur l'évaluation de l'**incertitude** sont disponibles dans l'Annexe A.

L'intervalle de fréquence sur lequel la sensibilité est donnée et sur lequel l'**incertitude** s'applique doit être indiqué. Pour les besoins de la présente norme, les valeurs de sensibilité et d'**incertitude** peuvent être données séparément pour plusieurs intervalles de fréquence. La réponse en fréquence peut être donnée en termes de valeurs de sensibilité absolue ou dans une représentation en valeur relative, en fonction de la référence à la sensibilité absolue de l'**hydrophone** à une certaine fréquence. Dans le cas d'une représentation en valeur relative, la sensibilité de référence et la fréquence à laquelle elle s'applique doivent être précisées.

Les méthodes permettant de déterminer la sensibilité et son **incertitude** doivent être indiquées.

Un étalonnage est uniquement valide pour les conditions d'environnement existantes lors de l'étalonnage. Les conditions d'environnement liées audit étalonnage doivent donc être indiquées. Il doit s'agir de toutes les conditions susceptibles d'avoir une influence sur la sensibilité du dispositif d'essai. Les conditions à reporter doivent inclure:

- la date de l'étalonnage;
- la température de l'eau et son **incertitude**;
- si l'**ensemble d'hydrophones** contient ou non un **préamplificateur d'hydrophone**, y compris les informations d'identification unique;
- les propriétés de l'eau, la durée d'immersion et le mode opératoire d'humidification adopté (ajout d'un agent mouillant, par exemple);

NOTE 3 La sensibilité d'une seule couche (les **hydrophones** à membrane non blindés du point de vue électrique, par exemple), est affectée par la conductivité électrique de l'eau utilisée.

NOTE 4 La réponse de certains **hydrophones** peut changer lors de l'immersion dans l'eau. Il est donc important de procéder aux étalonnages uniquement après une immersion suffisante, de manière à stabiliser la réponse.

- l'orientation de l'**hydrophone** par rapport à l'axe ou à la marque d'alignement placé sur son corps ou son enveloppe;
- si la disposition du montage a un impact sur la sensibilité d'un **hydrophone**, ses caractéristiques doivent être spécifiées;

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.

- une spécification des caractéristiques des câbles supplémentaires connectés à l'**hydrophone**, lors de l'étalonnage;
- la direction nominale de l'incidence ultrasonore liée à l'**hydrophone**;

NOTE 5 6 Le dernier point est important. Des documents [4] ont démontré que, même avec des **hydrophones** à membrane, la réponse peut changer suite à l'inversion de la direction de propagation des ultrasons par rapport à l'**hydrophone**.

- la pression acoustique maximale relevée par l'**hydrophone** lors de l'étalonnage;

NOTE 6 7 L'Annexe B décrit la linéarité des hydrophones en polyfluorure de vinylidène (PVDF) utilisée pour caractériser les champs acoustiques à haute amplitude.

- toutes les hypothèses concernant le dispositif soumis à essai (la position du **centre de référence de l'hydrophone**, par exemple).

Si un **hydrophone** étalonné est utilisé dans un environnement sensiblement différent de celui qui existait lors de l'étalonnage, l'utilisateur risque de devoir revoir à la hausse l'évaluation des incertitudes de mesure pour tenir compte de la modification de l'environnement.

5.4 Périodes d'étalonnage recommandées

La période d'étalonnage recommandée de l'**hydrophone** dépend de ses caractéristiques. Cet intervalle doit être spécifié par le fabricant.

NOTE 1 Une période d'étalonnage d'une année sera appropriée dans la plupart des cas (voir la CEI 62127-3).

Il est recommandé d'étalonner tous les ans les **hydrophones** de référence, qui sont uniquement utilisés à des fins d'étalonnage. Si les **hydrophones** sont utilisés dans le champ, des étalonnages peuvent s'avérer nécessaires à des intervalles plus courts.

NOTE 2 Il peut être utile de vérifier l'étalonnage d'un **hydrophone** en fonctionnement (ou de champ) en le comparant par "contrôle ponctuel" à un second **hydrophone** (de référence) étalonné ou une à source de contrôle, en s'appuyant sur les concepts de forme d'onde décrits dans l'Annexe G. Dans les cas extrêmes, relatifs à la stabilité d'un **hydrophone** en fonctionnement, cela peut être réalisé avant et après les mesures (voir l'utilisation de l'**hydrophone** dans la CEI 62127-1).

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

6.1 Positionnement mécanique

6.1.1 Généralités

Il est nécessaire de placer et d'orienter précisément le transducteur, l'**hydrophone** et le réflecteur (pour la méthode de réciprocité spécifiée dans l'Article 9). 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 et de leur orientation, de sorte que la modification du signal de sortie de l'**hydrophone** soit inférieure à 0,1 dB lorsque les montages contrôlant la position spatiale ou l'orientation relative de l'**hydrophone** sont déplacés par incrément de un.

6.1.2 Précision de la position axiale de l'hydrophone

La distance axiale du **centre de référence de l'hydrophone** à partir du transducteur doit être connue et reproductible à 0,2 mm près.

NOTE 1 Pour déduire l'**incertitude** d'étalonnage, des mesures de répétition peuvent être réalisées. Elles peuvent impliquer la dépose, puis la remise à la même place de l'**hydrophone** dans le champ du transducteur.

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.

Cette exigence peut faire l'objet de modification dans le cas de transducteurs source à focalisation, dépendants de la distribution réelle du champ axial.

NOTE-2 3 Pour les transducteurs source à focalisation fonctionnant dans la plage de fréquences de la présente norme, le positionnement est essentiel. Les éléments suivants sont une évaluation de la modification de la distance axiale par rapport à la longueur focale, c'est-à-dire $\Delta z = F - z$, donnant une réduction de pression de 1 dB. L'équation théorique $\sin[\xi(1/z - 1/F)]/[\xi(1/z - 1/F)] = 0,89$, où $\xi = \pi a_t^2 f / (2c)$, un développement sinusoïdal à deux termes donne $\Delta z = 0,808 F^2 / \xi$.

NOTE-3 4 Dans l'exemple suivant, si une onde ultrasonore plane dans la gamme d'amplitudes linéaires est propagée dans une eau à 22 °C, les amplitudes ultrasonores aux deux positions axiales placées à 2 mm d'intervalle diffèrent de 0,09 dB ou de 0,7 dB pour une fréquence de 15 MHz ou de 40 MHz, respectivement, suite à l'atténuation en fonction de la fréquence (voir Annexe E).

6.1.3 Précision de la position latérale de l'hydrophone

Il convient de vérifier la ~~dépendance~~ **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**.

Concernant la position latérale de l'hydrophone, le signal de sortie ne doit pas être diminué de plus de 0,5 dB par rapport à la valeur maximale.

NOTE Dans le **champ lointain** d'une source circulaire à piston théorique plane et dans le plan focal d'un transducteur à focalisation théorique dans des conditions de propagation linéaire, la distance latérale depuis l'axe du champ est $r = 0,107 c z / (f a_t)$ pour une réduction d'amplitude de 0,5 dB et $r = 0,151 c z / (f a_t)$ pour une réduction d'amplitude de 1 dB.

6.2 Mesures et stabilité de la température

Les propriétés électroacoustiques des **hydrophones** varient en fonction de la température ambiante. C'est la raison pour laquelle il est recommandé, dans la mesure du possible, d'étalonner l'**hydrophone** dans les mêmes conditions de température que celles dans lesquelles il sera utilisé. Si cela n'est pas possible, les valeurs de sensibilité et de réponse en fréquence de l'**hydrophone** peuvent être corrigées en fonction des étalonnages précédents ou de modèles d'analyse validés. Il convient que l'**incertitude** des valeurs corrigées de la sensibilité et de la réponse de l'**hydrophone** soient inférieures aux valeurs non corrigées.

NOTE Il est recommandé que les dérives en température soient évitées pour deux raisons:

- a) l'amplitude de l'onde ultrasonore arrivant à l'**hydrophone** dépend de la température, l'atténuation ultrasonique dans l'eau dépendant de la température (voir Annexe E);
- b) le temps de vol du signal ultrasonore dépend de la température, la vitesse du son dans l'eau dépendant de la température (voir Annexe E). Cela est lié au réglage du temps de commutation pour les giclées ou les impulsions et de la spectrométrie de temporisation.

Compte tenu de a), l'exemple suivant peut être donné. Si une onde ultrasonore dans la gamme d'amplitudes linéaire se propage sur 15 cm à une température d'environ 22 °C, l'amplitude ultrasonore obtenue diffère, pour un écart de 1 °C entre deux températures, de 0,2 dB à une fréquence de 15 MHz et de 1,5 dB à une fréquence de 40 MHz. (Le coefficient d'atténuation de petite amplitude dans l'eau est proportionnel au carré de la fréquence. Les valeurs en fonction de la température sont données dans l'Annexe E).

Compte tenu de b), la recommandation suivante peut être donnée: dans une mesure de Type II spécifiée dans l'Article 12 (comparaison de la sensibilité de plusieurs hydrophones), il convient d'ajuster la distance axiale de l'**hydrophone** à une durée de propagation constante.

6.3 Dimension de l'hydrophone

L'élément actif d'un **hydrophone** génère une tension dans ses électrodes proportionnelles à la pression acoustique moyenne sur sa surface. Si une résolution spatiale totale doit être obtenue, le **rayon efficace de l'hydrophone** doit être petit comparé à la longueur d'onde de la composante à la fréquence la plus élevée dans le champ acoustique utilisé pour l'étalonnage. De plus, la pression acoustique réelle sur la surface sensible de l'**hydrophone** est influencée par la diffraction de l'**hydrophone** lui-même [5], [6], [7].

NOTE 1 Si la surface active de l'**hydrophone** est clairement connue et définie, il peut être possible de supprimer les effets de la moyenne spatiale et de la diffraction, à une fréquence donnée, par déconvolution, en fonction des dimensions connues de l'élément actif.

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

Le réservoir d'essai doit être suffisamment large pour établir des conditions en champ libre à la fréquence considérée la plus basse, ~~et pour faire en sorte que la distance entre le transducteur et l'hydrophone ou un réflecteur (pour la méthode de réciprocité spécifiée dans l'Article 9) soit au moins égale à 1,5 fois la distance du champ proche des transducteurs utilisés.~~ 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.

Il convient que les parois du réservoir et la surface de l'eau soit placées à une distance suffisante du transducteur et de l'**hydrophone** pour que le signal issu des réflexions au niveau de ces surfaces ne gêne pas l'arrivée du premier signal généré par le transducteur. De plus, dans la mesure du possible, il convient que ces surfaces soient revêtues de matériaux neutres du point de vue acoustique.

Il est important que le signal acoustique ne soit pas pollué par des réflexions. Il est recommandé de procéder aux vérifications suivantes avant chaque mesure. Dans tous les cas où des giclées ou des impulsions sont appliquées, il convient d'observer le signal de sortie de l'**hydrophone** lorsque la distance entre le transducteur et l'**hydrophone** varie de quelques millimètres, afin de mesurer l'absence d'écho entre le transducteur et l'**hydrophone** à partir du signal reçu. Si ces échos gênent le signal reçu, une solution consiste à modifier la fréquence de répétition des impulsions.

Les propriétés de l'eau doivent correspondre à la spécification fournie par le fabricant de l'**hydrophone**.

NOTE La sensibilité de certains hydrophones peut dépendre de la conductivité électrique du milieu aqueux. Dans ce cas, il convient d'accorder une attention particulière aux conditions de mesure pour s'assurer qu'elles se rapprochent le plus possible de celles de l'étalonnage.

6.5 Mesure de la tension de sortie

Le signal provenant de l'**hydrophone** ou du **préamplificateur de l'hydrophone** et d'un transducteur doit être mesuré à l'aide d'un oscilloscope, d'un analyseur numérique de signaux, d'un analyseur de spectre ou d'un autre appareil approprié offrant une largeur de bande et une sensibilité suffisantes. Une amplification supplémentaire du signal provenant de l'**hydrophone** ou du **préamplificateur de l'hydrophone** peut également être nécessaire afin d'obtenir un rapport signal-bruit acceptable.

L'appareil auquel est connecté l'**hydrophone** ou l'**amplificateur intégré** (un oscilloscope, un analyseur numérique de signaux, un analyseur de spectre ou un amplificateur, par exemple) doit satisfaire aux exigences ci-dessous:

- son impédance d'entrée complexe sur la plage de fréquences concernée doit être connue, de manière à déterminer la **sensibilité en bout de câble** (voir Annexe C);
- sa linéarité avec le signal d'entrée sur une gamme dynamique de 50 dB doit être supérieure à $\pm 0,3$ dB;
- dans le cas d'un analyseur numérique de signaux: pour enregistrer les formes d'onde temporelles, la fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins $20f$ échantillons par seconde, où f est exprimé en MHz. De même, le gain doit être ajusté pour admettre au moins sept bits significatifs dans la forme d'onde numérique.

NOTE Pour la limite de fréquence supérieure de 40 MHz spécifiée dans la présente norme, il convient que la fréquence d'échantillonnage soit de 800 MHz au moins.

7 Considérations électriques

7.1 Type de signal

Le signal utilisé pour l'étalonnage peut être sinusoïdal (onde entretenue), sinusoïdal balayé [8] ou à onde pulsée sinusoïdale (giclée de tonalité à déclenchement périodique). Le nombre de fréquences doit être suffisant pour s'assurer que les performances de l'**hydrophone** sont bien caractérisées sur la plage de fréquences souhaitée.

NOTE Les différents concepts de forme d'onde possibles qui peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur l'étalonnage de l'**hydrophone** sur la plage de fréquences considérée font l'objet de l'Annexe G.

7.2 Mise à la masse

Pour éviter les phénomènes de boucle de masse, il convient que les bornes électriques des transducteurs n'entrent pas en contact avec l'eau. Les parties métalliques exposées d'un **hydrophone** doivent être les seuls éléments de mise à la masse pour la retenue de tresse de l'**hydrophone** et l'amplificateur de l'**hydrophone**. Toutes les autres mises à la masse doivent être exclues.

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 Mesure de la tension de sortie de l'hydrophone

7.3.1 Généralités

La tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** doit être déterminée à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**.

Dans le cas d'un signal à ondes entretenues, la mesure peut être réalisée à l'aide d'un voltmètre à haute impédance. Toutefois, dans le cas des signaux à giclées de tonalité, il est possible d'améliorer la mesure en numérisant la forme d'onde de la tension de l'**hydrophone** à l'aide, par exemple, d'un oscilloscope numérique ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé. Si un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former une voie de mesure, ces éléments devront également être étalonnés.

NOTE Les signaux à ondes entretenues adaptés aux techniques d'étalonnage de l'**hydrophone** sont décrits dans l'Annexe H. Les concepts de forme d'onde modulée en amplitude sont présentés dans l'Annexe G.

7.3.2 Charge électrique avec appareil de mesure

Lors des mesures, l'**hydrophone** doit être connecté à un appareil de mesure à haute impédance d'entrée (amplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur). Si l'impédance de l'**hydrophone** est élevée (pour un petit **hydrophone** piézoélectrique de faible capacité électrique, par exemple), des considérations doivent être données quant à la charge électrique de l'**hydrophone** par l'appareil de mesure. Dans ce cas, des corrections de charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée afin d'obtenir la tension en circuit ouvert. Les corrections peuvent être calculées suivant le mode opératoire donné dans l'Annexe C. Si la même charge électrique est utilisée tout au long de l'étalonnage d'un **hydrophone** particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions individuelles mesurées.

NOTE 1 Si, dans une application pratique, l'**hydrophone** est utilisé avec des composants électroniques subséquents (un amplificateur ou un oscilloscope, par exemple), la réponse en fréquence de ces composants supplémentaires aura, bien entendu, une influence sur la réponse en fréquence de l'ensemble du système.

NOTE 2 Il convient d'accorder une attention particulière à la qualité de l'impédance de sortie de l'hydrophone/amplificateur par rapport à l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure connecté.

7.3.3 Charge électrique par rallonges de câble

Si une rallonge de câble est connectée à l'**hydrophone**, elle charge électriquement l'**hydrophone** et des corrections doivent être appliquées afin d'obtenir la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** en bout de câble. Si le câble et l'**hydrophone** apparaissent purement capacitifs du point de vue électrique (ce qui est généralement le cas pour un câble et pour un **hydrophone** dans la plage de fréquences inférieure à la résonance), une correction peut être déduite des capacités électriques de l'**hydrophone** et du câble. Si l'impédance de l'hydrophone n'est pas purement capacitive (à des fréquences proches de la résonance, par exemple), l'impédance complexe doit être utilisée pour calculer la correction de charge. Des informations relatives aux cas exposés ci-dessus sont données dans l'Annexe C. Si la même rallonge de câble est utilisée tout au long de l'étalonnage d'un **hydrophone** particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions individuelles mesurées.

NOTE Pour limiter l'impact de la charge électrique, certains **hydrophones** sont équipés d'un **préamplificateur d'hydrophone** généralement monté aussi près que possible de l'**hydrophone** (voir 7.3.6). Cela est particulièrement important, à des fréquences élevées, étant donné qu'il s'agit d'un moyen de limiter l'effet de résonance du câble.

7.3.4 Bruit

Le niveau de bruit électrique peut altérer la précision des mesures électriques. Le rapport signal-bruit doit être suffisant pour que les mesures puissent être réalisées sans perte significative de précision. Il est préférable que l'amplitude du signal soit au moins 20 dB supérieure au niveau de bruit.

NOTE 1 Il est possible de réduire le niveau de bruit parasite à large bande à l'aide d'un filtre passe-bande dont la largeur de bande est suffisamment importante pour permettre au signal de passer sans déformation.

NOTE 2 En présence de bruit électrique, le rapport signal-bruit peut être amélioré en calculant la moyenne des signaux répétés. Dans le cas des bruits aléatoires, la moyenne des signaux N_{av} améliorera le rapport signal-bruit d'un facteur de la racine carrée de N_{av} .

7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence) et interférence acoustique

D'une manière générale, en cas d'interférence et de diaphonie, le nombre de moyennes et le filtrage à bande étroite n'améliorent pas la situation. Il convient de s'efforcer de déterminer la cause du problème et de suivre la procédure visant à en limiter les effets. Le niveau d'interférence acoustique doit être au moins 30 dB inférieur au niveau du signal.

En présence de diaphonie avec les signaux à giclées de tonalité, il convient de vérifier que la longueur de la giclée est supérieure au délai de propagation acoustique.

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.

Dans le cas d'un signal à ondes entretenues, le niveau de diaphonie doit être au moins 40 dB inférieur au niveau du signal.

NOTE 2 Le niveau du capteur de radiofréquence ou de la diaphonie peut être évalué en plaçant une (mince) couche de matériau assurant une excellente atténuation acoustique (du polystyrène expansé, par exemple) directement entre le transducteur et l'**hydrophone**. Cela permettra d'annuler intégralement le signal acoustique, en laissant le signal dû au capteur.

7.3.6 Préamplificateurs d'hydrophone intégrés

Si un **hydrophone** est équipé d'un **préamplificateur d'hydrophone**, la sensibilité peut être exprimée comme la sensibilité en bout de câble (notamment les performances du **préamplificateur d'hydrophone**). Si un hydrophone est équipé d'un **préamplificateur d'hydrophone** intégré, il n'est pas utile de corriger la charge électrique par rallonges de câble ou appareils de mesure.

8 Préparation des hydrophones

8.1 Généralités

Avant de procéder à l'étalonnage réel, il est nécessaire de préparer soigneusement les **hydrophones**, comme le soulignent les paragraphes ci-après.

8.2 Humidification

~~Pour s'assurer que l'eau humidifie correctement l'hydrophone sans retenir un film d'air ou des bulles à sa surface, un agent mouillant peut être appliqué sur toute la surface du transducteur. Il convient qu'aucune zone sèche ne soit visible sur l'hydrophone lorsqu'il est immergé, puis retiré de l'eau. 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.

8.3 Support de l'hydrophone

Le support idéal d'un **hydrophone** doit avoir peu d'influence sur la sensibilité mesurée. Toutefois, certains **hydrophones** peuvent influencer la méthode de montage dans une plus large mesure.

Si le montage exerce une quelconque influence, il convient d'étalonner l'**hydrophone** sur le même montage que celui qui sera utilisé pour les mesures réalisées avec l'**hydrophone** dans le champ. Si le montage influence la sensibilité mesurée, l'étalonnage est uniquement valide pour le type de montage utilisé. Si l'**hydrophone** est sensible au type de support/montage, il convient d'accompagner les résultats d'une description de la disposition du montage.

8.4 Influence du câble

Si le câble relié à l'**hydrophone** doit être allongé pour les besoins de l'étalonnage, l'impédance électrique de la rallonge de câble doit être mesurée séparément afin de calculer l'influence de la charge électrique. La manière de tenir compte de l'influence de la charge électrique est présentée dans l'Annexe C.

9 Etalonnage réciproque en champ libre

9.1 Généralités

Cet article spécifie le principal étalonnage des **hydrophones** dans un volume d'eau virtuellement illimité, c'est-à-dire dans des conditions en **champ libre** faisant appel au principe de réciprocité.

9.2 Objet

Cet article a pour objet de spécifier différentes méthodes d'étalonnage absolu d'**hydrophones** de laboratoire normalisés avec la plus petite **incertitude** qu'il est possible d'obtenir. Ces méthodes couvrent la plage de fréquences comprise entre 50 kHz et 15 MHz.

9.3 Principes généraux

9.3.1 Généralités

Dans le cas d'un transducteur électroacoustique linéaire, passif et réversible, il existe une relation bien définie entre la sensibilité du transducteur en champ libre utilisé comme détecteur et sa réponse au courant appliqué. Cette relation est exprimée pour une disposition particulière des composants à l'intérieur d'un système de transducteurs dans la définition du coefficient de réciprocité.

Tous les étalonnages reposant sur le principe de réciprocité nécessitent l'utilisation d'un transducteur réciproque à la fois comme émetteur et récepteur. A condition de connaître les modifications dont font l'objet l'émission et la réception dans le champ acoustique, la réponse en émission et la sensibilité à la réception du transducteur peuvent être déterminées directement en mesurant la tension du courant d'attaque et du signal reçu. Cette méthode présente l'avantage évident de déterminer les paramètres acoustiques nécessaires en mesurant uniquement des grandeurs électriques. Dans la pratique, les étalonnages reposant sur le principe de réciprocité peuvent se présenter sous plusieurs formes, brièvement spécifiées ci-dessous.

9.3.2 Méthode d'étalonnage réciproque à trois transducteurs

Un mode opératoire souvent utilisé pour les applications en acoustique marine implique l'utilisation de trois transducteurs (voir la CEI 60565:2006).

Toutefois, cette méthode peut être difficile à mettre en œuvre à des fréquences élevées, compte tenu de la nécessité de placer et d'orienter le transducteur de manière plus précise, et de la nature complexe des caractéristiques de la réponse directionnelle des transducteurs utilisés aux fréquences de quelques MHz. Par conséquent, cette méthode est recommandée dans le cas d'étalonnages dans la plage de fréquences comprises entre 50 kHz et 1 MHz.

9.3.3 Méthode d'étalonnage par auto-réciprocité

L'étalonnage par auto-réciprocité, qui implique l'utilisation du transducteur d'essai et d'un réflecteur, nécessite un minimum de réglage géométrique. Toutefois, cette technique ne peut être généralisée aux **hydrophones** à haute fréquence qui, en raison de leur dimension, disposent d'une sortie acoustique insuffisante pour un rapport signal-bruit adéquat dans le signal reçu (le diamètre minimal d'un transducteur pratique est d'environ 2 mm).

9.3.4 Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

Pour la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 15 MHz, les **hydrophones** normalisés peuvent être étalonnés par la méthode à deux transducteurs, dans laquelle l'**hydrophone** est placé dans le champ connu généré par un transducteur auxiliaire, lequel champ ayant été préalablement quantifié dans le cadre des modes opératoires d'auto-réciprocité. La technique permet d'obtenir des données d'étalonnage d'une précision correspondant aux spécifications de performances établies pour l'**hydrophone** normalisé. Cependant, elle n'implique pas les mêmes réglages essentiels de la position et de l'orientation des composants que la méthode à trois transducteurs.

9.4 Méthode d'étalonnage réciproque à deux transducteurs

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

9.4.1 Appareils

Il convient que le réflecteur soit composé d'un disque en acier inoxydable de diamètre suffisant pour contenir la totalité du faisceau acoustique provenant de transducteurs auxiliaires à une distance de sa surface d'au moins 1,5 fois la distance du champ proche, donnée par $N_1 = a_t^2 / \lambda$, où a_t est le rayon efficace du transducteur ultrasonique, et λ la longueur d'onde ultrasonore dans l'eau à sa fréquence de fonctionnement.

L'épaisseur du réflecteur doit être telle que la première réflexion provenant de la surface arrière ne gêne pas celle provenant directement de la surface avant pour la giclée de tonalité à la fréquence la plus basse utilisée. Le réflecteur doit également être plat à $\pm 10 \mu\text{m}$, avec un état de surface correct à $\pm 5 \mu\text{m}$.

9.4.2 Mode opératoire

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. ~~Dans la configuration, le transducteur auxiliaire est étalonné, et le réflecteur retiré pour étalonner l'hydrophone.~~ Cela permet d'éviter les erreurs provoquées par

la rotation du réflecteur et ~~de~~ faciliter l'alignement de l'**hydrophone** et du réflecteur auxiliaire. L'erreur peut être réduite d'environ 0,5 dB.

10 Etalonnage en champ libre par exploration planaire

10.1 Généralités

Cet article spécifie l'étalonnage des **hydrophones** à l'aide de la méthode d'exploration planaire.

10.2 Objet

Cet article a pour objet de spécifier la méthode d'étalonnage d'un **hydrophone** par exploration planaire. Cette méthode utilise un transducteur de référence dont la puissance de sortie est connue. Il peut s'agir d'une unité normalisée dont la puissance de sortie est connue et reproductible, qui peut être identifiée par rapport à des étalons nationaux ou être étalonnée avant l'étalonnage par exploration planaire à l'aide, par exemple, d'une balance à force de radiation conforme à la CEI 61161. La méthode couvre la plage de fréquences comprise entre 500 kHz et 15 MHz, bien que des fréquences plus élevées puissent être appliquées, avec des incertitudes dégradées.

10.3 Principe général

Si M_l est la **sensibilité en bout de câble d'un hydrophone** dont le **centre de référence** se trouve aux coordonnées (x,y,z) , la **pression acoustique instantanée** $p(x,y,z,t)$ est liée à la tension en bout de câble mesurée $U_L(x,y,z,t)$ par

$$p(x,y,z,t) = U_L(x,y,z,t)/M_L \quad (3)$$

où

(x,y,z) sont les coordonnées d'un point dans le champ; et

t est un instant.

Ici, $p(x,y,z,t)$ fait référence à la pression acoustique dans une onde plane au **centre de référence de l'hydrophone** si l'**hydrophone** a été retiré.

Le vecteur d'**intensité instantanée**, $\vec{I}(x,y,z,t)$, en un point de référence d'un champ ultrasonique à partir d'un transducteur dont le centre est l'origine du système de coordonnées est donné par:

$$\vec{I}(x,y,z,t) = p(x,y,z,t) \cdot \vec{v}(x,y,z,t) \quad (4)$$

où

$\vec{v}(x,y,z,t)$ est le vecteur de vitesse acoustique instantanée au point de référence.

Les composants de $\vec{I}$ et $\vec{v}$ dans la direction de propagation seront pris en compte, les limitant ainsi aux grandeurs scalaires I et v .

Dans le cas de la propagation progressive de l'onde dans certaines conditions ($a_t/l \leq 0,5$), où l est la distance axiale à partir du transducteur, l'**intensité instantanée** peut être donnée [9] par:

$$I(x,y,z,t) = [p(x,y,z,t)]^2 / (\rho c) \quad (5)$$

où

ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau); et

c est la vitesse du son dans l'eau.

(Voir l'Annexe E pour connaître la dépendance à la température de ρ et c de l'eau, le milieu de transmission recommandé utilisé pour mesurer la puissance).

La puissance acoustique totale $P(l)$ émise à travers un plan $z = l$ perpendiculaire à l'axe z est donnée par:

$$P(l) = \iint \overline{l(x, y, l, t)} \cos \theta \, dy \, dx \quad (6)$$

où

$dy \, dx$ est une zone élémentaire du plan $z = l$;

θ est l'angle entre l'axe z et la direction de propagation, l'intégrale indiquant l'intégration sur la totalité du plan.

NOTE 1 Aux distances l considérées dans la présente norme (supérieures à a_t^2/λ , où a_t est le rayon efficace du transducteur ultrasonique), θ peut être considéré comme l'angle entre l'axe z et la droite reliant le centre du transducteur et celui de l'**hydrophone**.

La barre de l'équation (6) indique la valeur moyenne temporelle définie pour une grandeur g par:

$$\bar{g} = \lim(T \rightarrow \infty) \left[\left(\frac{1}{2T} \right) \int_{-T}^T g(t) \, dt \right] \quad (7)$$

En prenant la moyenne temporelle de l'équation (5)

$$\overline{l(x, y, z, t)} = \overline{p(x, y, z, t)^2 / (\rho c)} \quad (8)$$

et de l'équation (3)

$$\overline{l(x, y, z, t)} = \overline{U_L(x, y, z, t)^2 / (M_L^2 \rho c)} \quad (9)$$

où

$U_L(x, y, z, t)$ est la tension en bout de câble d'un **hydrophone** placé au point de référence (x, y, z) à l'instant t .

Ici, il est supposé que la valeur moyenne temporelle du carré de la tension en bout de câble est déduite. Dans l'équation (5), sur le plan $z = l$ et en ignorant le terme $\cos(\theta)$ (voir D.3.9), la **sensibilité en bout de câble**, M_L , est donnée par:

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint \left[\overline{U_L(x, y, l, t)^2} \right] dy \, dx \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Par conséquent, la **sensibilité en bout de câble d'un hydrophone** peut être déterminée en balayant l'hydrophone sur un plan du faisceau acoustique et en divisant l'intégrale de la valeur moyenne du carré du signal de l'**hydrophone** par la puissance totale du faisceau.

NOTE 2 La **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, M_c , peut être déterminée en connaissant les impédances électriques de l'**hydrophone** et de l'amplificateur déterminées de la manière décrite dans l'Annexe C.

10.4 Exigences liées au mode opératoire

10.4.1 Balayage de l'hydrophone

Plusieurs méthodes permettent de balayer l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ dans le faisceau acoustique. La méthode la plus complète consiste à obtenir une matrice rectangulaire des points d'échantillonnage en déplaçant l'**hydrophone** dans un balayage de trame à deux dimensions. Un autre mode opératoire de balayage est possible si le profil du faisceau provenant du transducteur peut être considéré comme à peu près symétrique du point de vue cylindrique. Dans ce cas, il est possible de réaliser un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau**. Il convient que ces balayages passent par le **centre du faisceau** acoustique et qu'ils soient espacés par incréments angulaires égaux. Par exemple, si deux balayages sont réalisés, il convient qu'ils soient espacés de 90° . Des informations relatives au choix des types de balayage sont données dans l'Annexe D.

10.5 Mode opératoire

10.5.1 Mesure de la puissance

Utiliser un transducteur doté d'un élément actif en disque plat dont la puissance de sortie totale est connue à une fréquence particulière f . Il peut s'agir d'un transducteur normalisé [10], auquel cas la puissance de sortie doit être connue en termes de tension d'attaque particulière.

Par ailleurs, déterminer la puissance de sortie à l'aide de la méthode de force de radiation spécifiée dans la CEI 61161 [11]).

Quelle que soit la méthode utilisée, déterminer la puissance acoustique totale émise par un transducteur, P_0 , à la fréquence f dans des conditions d'excitation électrique sinusoïdale entretenue à une tension d'attaque particulière U_T ou sur une gamme de différentes tensions appliquées. Ces mesures donnent la valeur de la puissance de sortie divisée par le carré de la tension (voir CEI 61161).

10.5.2 Montage du transducteur

Monter le transducteur dans un réservoir de balayage par faisceau et l'aligner de sorte que l'**axe du faisceau** du transducteur soit parallèle à l'axe z du système de balayage. Monter l'**hydrophone** à étalonner dans le réservoir de balayage et l'aligner conformément au mode opératoire spécifié dans la CEI 62127-1. A l'issue de l'alignement, l'axe z du système de balayage doit être parallèle à l'**axe du faisceau** du transducteur et à la direction de la sensibilité maximale de l'**hydrophone**.

NOTE D'une manière générale, les dispositions du montage sont telles que le transducteur et l'**hydrophone** sont montés à l'horizontale ou à la verticale. Quelle que soit la disposition utilisée, il convient de conserver l'alignement relatif du transducteur et de l'**hydrophone** à l'un des axes du système de balayage (appelé axe z ci-dessus).

10.5.3 Conditions de mesure

Appliquer une excitation sinusoïdale à déclenchement périodique (giclée de tonalité) au transducteur, contenant un nombre d'oscillations suffisant pour assurer la régularité de la fréquence f à une tension d'attaque particulière U_T ou à une tension dans la gamme utilisée dans la technique de force de radiation. Placer l'**hydrophone** à $z = l$ dans le champ lointain du transducteur et rechercher le point de pression acoustique de crête. Choisir la distance l avec soin, en tenant compte des corrections de la moyenne spatiale, de la directivité et de l'atténuation (voir Annexe D), ainsi que de la nécessité d'obtenir un rapport signal-bruit maximal.

NOTE Une valeur de l dans la gamme comprise entre a_t^2/λ et $3a_t^2/\lambda$ est en générale satisfaisante, où a_t est le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique non focalisé sans focalisation** et λ la longueur d'onde ultrasonore. Le rayon géométrique du transducteur peut être utilisé si le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique non focalisé sans focalisation** (a_t) n'est pas connu.

Utiliser l'excitation à ondes entretenues du transducteur ultrasonique si le déclenchement périodique de l'excitation est impraticable. Dans ce cas, éviter absolument les réflexions provenant des parois du réservoir, de l'**hydrophone** et de son support, ainsi que la formation d'ondes stationnaires.

10.5.4 Mesures

Mesurer l'amplitude de la tension de sortie de l'**hydrophone** au fur et à mesure du balayage de l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ perpendiculaire à l'axe z , dans le cadre d'un balayage de trame ou d'un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau**. Mesurer la tension en bout de câble $U_L(x, y, l, t)$ au niveau de l'**hydrophone** en fonction de la position de l'**hydrophone** dans le faisceau acoustique. Déterminer l'étendue de la zone balayée en fonction du niveau de bruit. Cumuler le carré de la tension sur la surface du faisceau acoustique, puis en déduire la valeur de la **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone** à la fréquence f (voir Annexe D).

10.6 Corrections et sources d'incertitude

Faire une déclaration finale de l'**incertitude** totale dans la détermination de la **sensibilité en bout de câble de l'hydrophone**. Des informations détaillées relatives à l'évaluation de ces sources d'incertitude sont disponibles dans l'Annexe D.

11 Etalonnage en champ libre par interférométrie optique

11.1 Généralités

Actuellement, l'étalonnage en champ libre des **hydrophones** à l'aide de techniques optiques est limité à certains laboratoires spécialisés. Dans la présente norme, des informations relatives à cette technique d'étalonnage sont présentées dans l'Annexe F et sont données à titre informatif.

11.2 Principe

En principe, ces techniques nécessitent d'appliquer des éléments optiques pour déterminer le déplacement acoustique produit par un transducteur en un endroit du champ acoustique. Ces techniques sont réalisées à l'aide d'une fine membrane ou feuille placée à l'intérieur du champ, qui se déplace en fonction du déplacement acoustique. Une surface de la feuille, épaisse de quelques microns en général, est métallisée de manière à acquérir des propriétés de réflexion optique. Grâce aux techniques d'interférométrie optique, le déplacement peut être déterminé. Dans le champ lointain du transducteur, le déplacement est simplement lié à la pression acoustique, ce qui permet de déterminer cette dernière en un point du champ. Un **hydrophone** est étalonné en le plaçant au même endroit et en déterminant la tension de sortie. Deux réalisations de la technique mise en place par les laboratoires nationaux normalisés sont disponibles dans l'Annexe F.

12 Etalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé

12.1 Généralités

Dans cet article, deux types de mesure sont spécifiés:

- | | |
|---------|---|
| Type I | détermination de la réponse directionnelle ; |
| Type II | comparaison de la sensibilité de plusieurs hydrophones . |

12.2 Objet

Les deux mesures ci-dessus sont dites "relatives", ce qui signifie que plusieurs mesures de la tension de sortie de l'**hydrophone** dans des conditions pratiquement identiques sont réalisées, en variant un seul paramètre pertinent, et que les rapports de résultats (ou logarithmes des rapports de résultats) sont considérés.

NOTE Concernant le Type II, il est supposé ci-après que les sensibilités des deux **hydrophones** sont comparées. Cela peut aisément être étendu à trois **hydrophones**, voire plus.

12.3 Principe

Dans le type I, le paramètre modifié est l'angle d'orientation de l'**hydrophone**. Il est considéré que la tension de sortie de l'**hydrophone** à un certain angle est fonction de la tension de sortie de l'**hydrophone** dans une orientation de référence. Bien entendu, dans la pratique, cela sera le cas pour un ensemble d'angles de rotation. Ce type de mesure a pour objet d'obtenir la **réponse directionnelle** et le **rayon efficace** conformément à la CEI 62127-3.

Dans le type II, l'**hydrophone** lui-même est remplacé par un autre. Il est entendu ici que l'un est un **hydrophone** de référence, et l'autre l'**hydrophone** soumis à essai. Ce type de mesure a pour objet d'obtenir la sensibilité de l'**hydrophone** soumis à essai, si la sensibilité de l'**hydrophone** de référence est connue (à partir de tout étalonnage) et/ou la réponse en fréquence de l'**hydrophone** soumis à essai, si celle de l'**hydrophone** de référence est connue (à partir de tout étalonnage).

Ces mesures relatives offrent les fonctions suivantes en commun: elles sont réalisées dans un réservoir d'eau et dans le champ ultrasonique émis par un transducteur à caractériser ci-dessous. Dans la mesure du possible, il est essentiel que les mesures réalisées en relation les unes avec les autres le soient dans des conditions identiques, c'est-à-dire dans la même position dans le champ, dans les mêmes conditions d'excitation (forme d'onde et amplitude) et dans les mêmes conditions d'environnement (température, par exemple), etc. L'objectif est de travailler dans des conditions d'onde plane.

Pour les mesures de Type II, l'incertitude de l'étalonnage est influencée par la moyenne spatiale. Les méthodes d'évaluation de ces différentes configurations de comparaison sont spécifiées en 12.6.

12.4 Exigences liées au mode opératoire

12.4.1 Transducteur source

Le transducteur à source ultrasonique destiné aux mesures spécifiées ici doit être un transducteur ultrasonique à symétrie circulaire pouvant être utilisé dans l'eau. L'excitation électrique appliquée au transducteur, le type de transducteur et la nature de la forme d'onde acoustique à la position de l'hydrophone (linéaire, déformée de manière non linéaire) font l'objet de différents concepts. Chacun d'eux est décrit dans l'Annexe G. Des transducteurs non focalisés plats pour les concepts A, B ou C liés à la position de l'hydrophone ou un transducteur à focalisation pour les concepts D ou E liés à la position de l'hydrophone peuvent être utilisés. Selon le concept de forme d'onde choisi, il doit être en mesure de produire l'amplitude nécessaire (rapport signal-bruit adéquat dans le signal de l'**hydrophone**) aux valeurs de fréquence considérées. Cette exigence concerne l'amplificateur contrôlant le transducteur. Le transducteur doit être provisoirement stable et ne doit pas être à l'origine d'un réchauffement de l'eau supérieur aux limites acceptables de dérive en température.

NOTE Il est recommandé de procéder aux vérifications suivantes avant chaque mesure: dans tous les cas où des giclées ou des impulsions sont appliquées (concepts de forme d'onde temporelle a, b, c), il convient d'observer le signal de sortie de l'**hydrophone** lorsque la distance entre le transducteur et l'**hydrophone** varie de quelques millimètres, afin de s'assurer de l'absence d'écho entre le transducteur et l'**hydrophone** à partir du signal reçu. Si ces échos gênent le signal reçu, une solution consiste à modifier la fréquence de répétition des impulsions.

12.4.2 Signal d'attaque du transducteur source

L'amplitude du signal d'attaque du transducteur source doit être stable à $\pm 1\%$ près. Sa fréquence centrale doit être stable à $\pm 0,1\%$ près.

12.4.3 Système de mesure

Le système de mesure doit être conforme aux exigences des Articles 6, 7 et 8.

12.5 Mode opératoire

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

Placer l'**hydrophone** dans le réservoir d'eau et dans le champ du transducteur source, conformément au concept choisi de position de l'hydrophone (voir Annexe G), le **centre de référence de l'hydrophone** étant placé sur l'**axe du faisceau** du transducteur. Indiquer la configuration des mesures avec un dispositif mécanique permettant à l'**hydrophone** de pivoter autour d'un axe perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, et indépendamment des deux axes de rotation perpendiculaires l'un à l'autre. L'angle de rotation doit pouvoir être mesuré selon une résolution angulaire supérieure ou égale à $\theta_6/10$, où θ_6 est l'angle -6 dB, connu après la mesure ou approximativement déduit avant la mesure grâce au **rayon géométrique de l'hydrophone**.

L'**hydrophone** doit être pivoté de sorte que son **centre de référence** ne se déplace pas dans le champ ultrasonique, conformément aux exigences liées à la précision de la position de l'Article 6.

NOTE 1 Dans le cas des **hydrophones** à membrane nue, il est possible de vérifier si l'**hydrophone** pivote réellement autour de son centre en le faisant pivoter à 180° et en observant le décalage de l'instant d'arrivée qui en résulte de l'onde ultrasonore. Pour les hydrophones à aiguille, un montage particulier peut s'avérer nécessaire pour assurer la rotation par rapport au **centre de référence**.

La mesure peut être réalisée de deux manières: en mesurant la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de l'angle de rotation à une fréquence constante, ou en mesurant la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de la fréquence à un angle de rotation constant, et ce pour plusieurs valeurs d'angle de rotation. Dans ce dernier cas, réorganiser les données obtenues pour de nouveau obtenir la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de l'angle de rotation à une fréquence constante. Diviser la tension de sortie de l'**hydrophone** mesurée par celle obtenue dans l'orientation de la tension de sortie maximale.

NOTE 2 Pour donner une indication de la résolution angulaire nécessaire, il est possible de procéder à l'évaluation ci-après. Soit un rayon d'**hydrophone** de 0,25 mm et $c = 1\,488$ m/s pour l'eau à 22°C , les valeurs suivantes sont obtenues par l'équation (2) de la CEI 62127-3: $\theta_6 = 8^\circ$ pour une fréquence de 15 MHz et $\theta_6 = 3^\circ$ pour une fréquence de 40 MHz.

NOTE 3 Les valeurs de la vitesse du son c dans l'eau sont répertoriées dans l'Annexe E.

Utiliser les mesures de la réponse directionnelle pour définir le **rayon efficace** de l'élément actif de l'**hydrophone** à l'aide des deux expressions suivantes:

$$a_{h3} = 1,62 \, c / (2\pi f \sin \theta_3) \quad (11)$$

et

$$a_{h6} = 2,22 \, c / (2\pi f \sin \theta_6) \quad (12)$$

où

θ_3 et θ_6 sont les angles auxquels le signal de l'hydrophone a diminué de -3 dB et -6 dB respectivement.

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 ~~de rotation~~ choisi. De plus amples informations sur le **rayon efficace de l'hydrophone** peuvent être obtenues dans la CEI 62127-3.

12.5.2 Mesures (Type II): étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé

Ce type implique une série de mesures, dans laquelle les **hydrophones** sont placés l'un après l'autre dans le champ ultrasonique. Le minimum doit être une série de deux mesures, une avec chaque **hydrophone**. Toutefois, il est recommandé de mesurer à nouveau le premier **hydrophone** après le second (pour un total de trois mesures) afin de vérifier la stabilité du champ acoustique appliqué. Une série de cinq mesures au moins serait l'idéal.

Dans chaque mesure, placer l'**hydrophone** considéré dans le réservoir d'eau et dans le champ du transducteur source, à l'endroit prévu conformément au concept choisi de position de l'hydrophone (voir Annexe G). Optimiser le signal de sortie par ajustement latéral et rotatif de l'**hydrophone**.

Le **centre de référence** de l'**hydrophone** considéré doit être placé dans le champ ultrasonique exactement à l'endroit pertinent choisi pour cette série de mesures, conformément aux exigences liées à la précision de la position de l'Article 6. Indiquer la configuration des mesures avec les moyens mécaniques pour rendre ce placement possible. Un autre mode opératoire utile consiste à observer le temps de vol (durée de propagation) de la giclée ou de l'impulsion ultrasonore comme un indicateur de la distance entre le transducteur et l'**hydrophone**.

Mesurer la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de la fréquence, puis la prendre en compte par rapport aux résultats obtenus avec l'autre **hydrophone**.

Si les mesures sur les deux **hydrophones** ne sont pas réalisées dans les mêmes conditions de charge électrique, l'indiquer clairement et donner les exigences de calcul du rapport de sensibilité de l'**hydrophone** pour les mêmes conditions de charge.

12.6 Dimension maximale de l'hydrophone

Pour éviter les erreurs de mesure dues à la moyenne spatiale dans les mesures spécifiées en 12.5, le **rayon efficace** ne doit pas dépasser une limite $a_{\max}$ dépendant des caractéristiques de la mesure réelle selon la description de l'Annexe J.

S'il n'est pas possible de respecter cette exigence, un rayon d'**hydrophone** plus large peut être utilisé dans une situation particulière, à savoir dans la mesure de Type II, si la valeur du **rayon efficace** des deux **hydrophones** à comparer est identique à $\pm 5\%$.

Si ces deux exigences ne sont pas respectées, une correction théorique peut, dans la mesure du possible, être appliquée aux résultats obtenus, mais cela doit être clairement indiqué et expliqué, et la référence aux formules utilisées doit être donnée.

Annexe A (informative)

Evaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des hydrophones

A.1 Généralités

Pour être pleinement significatif, il convient que le résultat d'un étalonnage soit accompagné de son incertitude associée. Pour évaluer et exprimer l'incertitude de l'étalonnage, les directives de l'ISO *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (ISO GUM) [3] doivent être suivies. D'une manière générale, les composantes de l'incertitude sont regroupées en fonction de l'estimation des valeurs:

Type A: évaluée de manière statistique;

Type B: évaluée par d'autres moyens.

A.2 Incertitude (étendue) globale

Il convient d'obtenir l'incertitude globale à partir de toutes les composantes d'incertitude de la manière décrite dans l'ISO GUM [3].

Lors de la combinaison des composantes de l'incertitude, il convient de veiller à exprimer les valeurs de composante en décibels. Avant de procéder à la combinaison, il convient que les valeurs soient idéalement exprimées sous forme linéaire (en pourcentage ou en unité de grandeur, par exemple) et pas en décibels. La valeur finale de l'incertitude étendue peut être exprimée en unité de grandeur, en pourcentage ou convertie en décibels, selon le cas.

NOTE 1 Il convient de souligner que l'utilisation des décibels pour exprimer les incertitudes peut se traduire par des distributions dissymétriques (par exemple, +1,5 dB équivaut à +19 %, mais -1,5 dB équivaut à -16 %).

NOTE 2 Si chaque composante de l'incertitude est petite, c'est-à-dire inférieure à 1 dB, l'incertitude globale peut être calculée à l'aide des décibels.

A.3 Sources communes d'incertitude

La liste des sources communes d'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones est présentée ci-dessous. Il convient de ne pas considérer cette liste comme exhaustive. Cependant, elle peut être utilisée pour évaluer les incertitudes dans le cadre de la mise en place spécifique d'une méthode d'étalonnage. Selon la méthode d'étalonnage choisie et sa mise en place, certaines de ces sources (dans la mesure du possible, pas toutes) devront être évaluées. Par exemple, les erreurs provenant des instruments de mesure peuvent être limitées en utilisant la même voie de mesure (amplificateur, filtre, voltmètre, etc.) pour tous les rapports d'amplitude des signaux et des mesures uniquement. Toutefois, étant donné que cela peut ne pas être le cas dans toutes les mises en œuvre, les composantes de ces sources d'erreur ont été ajoutées à la liste.

Les sources d'incertitude spécifiques aux étalonnages réciproques en champ libre sont les suivantes:

- imprécision des évaluations du champ acoustique (celles indiquant qu'il s'agit d'un champ à ondes sphériques, par exemple);
- les erreurs de mesure de la distance de séparation;
- les erreurs dans les valeurs de la fréquence acoustique;
- les erreurs dans les valeurs de la densité de l'eau.

Les sources d'incertitude spécifiques aux étalonnages par comparaison sont les suivantes:

- les erreurs d'étalonnage de l'hydrophone de référence (principale source d'erreur dans l'étalonnage par comparaison);
- l'instabilité à court terme des transducteurs de référence utilisés pour l'étalonnage par comparaison (instabilité de la sortie d'un transducteur utilisé comme source de référence dans un étalonnage par comparaison, par exemple);
- l'instabilité de l'hydrophone de référence dans les étalonnages par comparaison (c'est-à-dire la variation de sensibilité de l'hydrophone de référence depuis le précédent étalonnage absolu);
- les différences de conditions d'environnement pour l'étalonnage par comparaison par rapport à celles de l'étalonnage absolu de l'hydrophone de référence, susceptibles de modifier la sensibilité de l'hydrophone de référence (température, immersion, caractéristiques du montage de l'hydrophone, etc.);
- l'imprécision des évaluations du champ acoustique produit par une source de référence (celles indiquant qu'il s'agit d'un champ à ondes sphériques, par exemple);
- les erreurs de positionnement des hydrophones au même point à l'intérieur du champ acoustique;
- l'instabilité des conditions de commande du transducteur de référence, notamment son manque de linéarité s'il est commandé par un signal différent de celui utilisé lors de son étalonnage absolu;
- les différences de conditions d'environnement pour l'étalonnage par comparaison par rapport à celles de l'étalonnage absolu du transducteur de référence, susceptibles de modifier la sensibilité du transducteur de référence (température, longueur de la période d'immersion, caractéristiques du montage de l'hydrophone).

Les sources d'incertitude communes à toutes les méthodes ci-dessus sont les suivantes:

- l'interférence liée aux réflexions acoustiques, se traduisant par un manque de conditions en champ libre;
- le manque de conditions en champ acoustique lointain;
- les effets de la moyenne spatiale des hydrophones en cours d'étalonnage en raison de leur dimension déterminée et du manque de conditions d'onde plane parfaites;
- le défaut d'alignement, particulièrement à des fréquences élevées où la réponse de l'hydrophone n'est absolument pas omnidirectionnelle;
- la diffusion acoustique à partir du montage de l'hydrophone (ou les vibrations relevées et diffusées par le montage);
- les erreurs de mesure de la tension reçue (y compris la précision de l'instrument de mesure, à savoir le voltmètre, les numériseurs, etc.);
- l'imprécision des gains de tous les amplificateurs, filtres et numériseurs utilisés;
- les erreurs de mesure du courant ou de la tension d'attaque;
- les erreurs dues au manque de linéarité du système de mesure (l'utilisation d'un affaiblisseur étalonné pour égaliser les signaux mesurés peut réduire cette contribution de manière significative);
- l'imprécision des affaiblisseurs de signal électrique utilisés;
- le bruit électrique, notamment les capteurs de radiofréquence;
- l'imprécision des corrections de charge électrique réalisées pour tenir compte de la charge du système par rallonges de câble et préamplificateurs;

- les bulles ou la présence d'air dans les transducteurs (il convient de réduire ce phénomène en nettoyant et rinçant soigneusement les transducteurs);
- les conditions d'environnement (la température de l'eau, par exemple). Les corrections ne doivent pas être incluses si les résultats de l'étalonnage spécifient les conditions et indiquent que l'étalonnage est uniquement valide pour les conditions spécifiées.

Annexe B (informative)

Comportement des capteurs polymères PVDF dans les champs ultrasoniques à haute intensité

B.1 Généralités

Les champs ultrasoniques à haute intensité sont généralement utilisés pour les applications biomédicales des ultrasons, et il est à présent bien établi que ces champs à haute amplitude sont à l'origine de phénomènes non linéaires, notamment de la déformation de l'onde et de la génération d'harmoniques dans le milieu de propagation [12], [13], [14]. Il a déjà été démontré que les sondes polymères ultrasoniques étalonnées à large bande, à membrane ou à aiguille, sont les **hydrophones** permettant de procéder aux mesures les plus précises des champs ultrasoniques, leurs paramètres de base (la réponse en fréquence, la **réponse directionnelle** et la sensibilité en tension, par exemple) ayant été décrits [15]. Toutefois, les informations relatives à la linéarité de la réponse des **hydrophones** sont plutôt limitées. La linéarité est un sujet d'importance particulière pour les applications médicales. Les appareils de diagnostic modernes sont capables de générer des amplitudes de pression instantanées de l'ordre de 10 MPa [16]. Il ne s'agit que d'un ordre d'amplitude inférieure à celles rencontrées dans la région focale des générateurs d'ondes de choc extracorporelles (lithotriteurs).

En outre, la linéarité de la réponse en pression de l'**hydrophone** est essentielle pour l'utilisation de méthodes d'étalonnage non linéaire [17].

Les essais décrits ci-dessous ont été réalisés afin de déterminer la linéarité des **hydrophones** à ultrasons en polymère PVDF. Une description partielle des résultats présentés a été publiée dans [18].

B.2 Contexte théorique

La théorie des ondes acoustiques d'amplitude finie peut avoir de nombreuses applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine et aérienne [12]. Plus récemment, les implications des phénomènes de propagation non linéaire dans la plage de fréquences de l'imagerie biomédicale ont été soulignées [13], [14].

Il est bien connu que le degré de déformation des ondes dépend de la distance de la source [12]. Cette relation représente un critère pratique de distinction des déformations de l'onde dues au phénomène de propagation non linéaire, c'est-à-dire la non-linéarité des équations différentielles sous-jacentes et du milieu de propagation (ici, l'eau). Ce même critère pratique permet de distinguer les déformations sus-mentionnées des déformations de l'onde associées à la réponse non linéaire de l'**hydrophone** à la pression, ou à la réponse non linéaire possible de l'émetteur ou de la source acoustique à l'excitation en tension. Cette théorie a été utilisée dans les essais décrits ci-dessous afin de s'assurer que la non-linéarité observée n'était pas associée à une fonction de transfert électroacoustique non linéaire possible.

B.3 Essais

Toutes les mesures décrites ici ont été réalisées dans de l'eau distillée et dégazée à $21,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$. La configuration expérimentale a utilisé différentes sources ultrasonores fonctionnant dans la plage de fréquences de 2,25 MHz à 10 MHz, ainsi que des **hydrophones**, à aiguille et à membrane notamment [15], [19]. De plus, un dispositif optoacoustique capable de générer des ondes de choc a été utilisé [20], [21]. Alors que les sources ultrasonores ont permis de générer des amplitudes de pression de l'ordre de 5,5 MPa [correspondant à des intensités instantanées (à la crête spatiale et temporelle) de l'ordre de $1\,000\text{ W cm}^{-2}$], la source optoacoustique a généré des ondes de choc dont les amplitudes de compression à la crête étaient supérieures à 10 MPa.

Ces deux sources et les **hydrophones** ont été soigneusement alignés à l'aide d'un système micromanipulateur x-y-z. Le signal détecté par l'**hydrophone** a été transmis à un analyseur de spectre, puis affiché sur son écran afin de déterminer la teneur en harmoniques. Par ailleurs, le signal a également été observé sur un oscilloscope, et des photographies des formes d'onde de propagation ont été prises, chacune correspondant à différentes distances de la source axiale.

Préalablement à chaque groupe de mesures, il a été vérifié que la déformation des ondes était due au phénomène de propagation non linéaire, et n'était pas le résultat de la dépendance non linéaire d'un port acoustique (surface émettrice) par rapport à la tension d'excitation. Comme mentionné ci-dessus, la vérification s'est appuyée sur le fait que la déformation des ondes acoustiques dépend de la distance par rapport à la source et a impliqué l'enregistrement de l'impulsion émise à différentes distances axiales. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'**hydrophones** à aiguille et à membrane nue [15], [19].

Ces trois différentes méthodes ont été utilisées pour déterminer la linéarité de la réponse des **hydrophones** en fonction de l'augmentation de la pression acoustique.

Dans le premier mode opératoire, la linéarité des **hydrophones** étalonnés de type à aiguille a été soumise à essai. Il s'agissait d'observer l'augmentation de la tension de sortie des sondes de 0,6 mm et 1 mm de diamètre avec augmentation de l'excitation des transducteurs source. La pression de compression à la crête maximale mesurée par les **hydrophones** dans la région focale des transducteurs utilisés était d'environ 5 MPa à 3 MHz.

Le second mode opératoire impliquait la mesure de la puissance acoustique totale générée par une source donnée. Des **hydrophones** polymères miniatures étalonnés de type à aiguille ou à membrane ont été utilisés pour balayer le champ, et la puissance totale émise a été calculée [22]. Les résultats des calculs ont été comparés à ceux des mesures réalisées aux mêmes emplacements du champ avec une balance à force de radiation acoustique. Ces mesures ont été réalisées dans la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 2 MHz afin de limiter les erreurs dues aux effets de la moyenne spatiale.

Le troisième mode opératoire a impliqué l'utilisation d'un convertisseur optoacoustique. Un précédent travail [23], [24], [25] mené sur des appareils chirurgicaux à ultrasons plus conventionnels ont montré qu'il convient que ce type de dispositif produise un champ divergent avec des amplitudes de pression diminuant conformément à la loi (distance)⁻¹.

NOTE Les expressions "loi (distance)⁻¹" ou "comportement (distance)⁻¹" signifient que le comportement de l'amplitude de la pression est proportionnel à la distance réciproque, lorsque la distance entre la source et le point du champ considéré augmente.

B.4 Résultats

Les mesures de linéarité présentées ici ont été réalisées à l'aide de 30 **hydrophones** à aiguille de 1 mm et 0,6 mm de diamètre [15], et environ 10 **hydrophones** à membrane [15], [19].

Dans le premier mode opératoire, comme mentionné ci-dessus, la linéarité des **hydrophones** à aiguille étalonnés a été soumise à essai. Il s'agissait d'augmenter progressivement la tension d'excitation du transducteur source à 3 MHz et de mesurer l'augmentation correspondante de la tension de sortie des hydrophones à aiguille de 0,6 mm et 1 mm de diamètre. Un tracé de la tension d'excitation par rapport au signal de l'**hydrophone** a montré une relation linéaire.

Dans le second mode opératoire, des **hydrophones** polymères miniatures étalonnés de type à aiguille ou à membrane ont été utilisés pour balayer le champ, et la puissance totale émise a été calculée [22]. Les résultats des calculs ont été comparés à ceux des mesures réalisées aux mêmes emplacements du champ avec une balance à force de radiation acoustique. Pour la même source sonore (1,5 MHz ou 2,25 MHz), la divergence entre la puissance acoustique telle que mesurée par la balance à force de radiation et celle déterminée à l'aide de la méthode de l'exploration planaire était d'environ 22 %.

Le troisième mode opératoire impliquait des mesures réalisées à la sortie d'un convertisseur optoacoustique. Dans la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 10 MHz, les formes d'onde générées par les sources sonores observées ont montré une caractéristique de forme du phénomène de propagation non linéaire associé aux propriétés non linéaires du milieu de propagation. Les dispositifs optoacoustiques ont généré des formes d'onde analogues à celles rencontrées dans la région focale des lithotriteurs disponibles dans le commerce. Le comportement $(\text{distance})^{-1}$ des dispositifs a été confirmé de manière expérimentale: l'amplitude maximale de pression mesurée était de l'ordre de 10 Mpa, et l'écart des caractéristiques $(\text{distance})^{-1}$ entraînait dans le cadre de l'**incertitude** expérimentale (15 %) [21].

Toute divergence par rapport à la loi $(\text{distance})^{-1}$ dépassant l'**incertitude** globale des mesures auraient impliqué une possibilité de non-linéarité dans la réponse de l'**hydrophone**. Néanmoins, aucune divergence de ce type n'a été observée avec les **hydrophones** à aiguille et à membrane [21].

B.5 Conclusions

La linéarité de la réponse en pression d'un certain nombre d'**hydrophones** polymères PVDF a été déterminée. Les mesures ont été réalisées à des niveaux d'amplitude de pression de l'ordre de 10 MPa. Différents modes opératoires d'essai ont été utilisés, et les résultats obtenus à l'aide de transducteurs acoustiques ont montré que les non-linéarités observées étaient clairement liées à la propagation de l'onde uniquement. Un excellent compromis a été obtenu entre les différentes conceptions de l'**hydrophone** polymère à aiguille et à membrane nue.

En outre, aucune divergence par rapport à la loi $(\text{distance})^{-1}$ dépassant l'**incertitude** globale des mesures n'a été observée avec les **hydrophones** à aiguille et à membrane. Comme cela a été mentionné ci-dessus, une telle divergence impliquerait une non-linéarité de la réponse en pression avec une augmentation de la pression acoustique.

Dans les essais décrits ci-dessus, les amplitudes de pression ont été limitées à environ 10 MPa. D'autres éléments, à l'appui des résultats décrits ci-dessus, émergent des essais des **hydrophones** PVDF conçus spécialement pour les applications acoustiques sous-marine [26], [27]. Des modifications négligeables, de l'ordre de 0,6 dB, de la réponse en fréquence des **hydrophones** ont été observées jusqu'à des pressions hydrostatiques de 69 MPa.

Selon les résultats des essais préliminaires et les informations publiées dans [26], [27], il est possible de conclure que les **hydrophones** polymères font preuve d'une excellente linéarité sur une gamme d'intensités typiques de celles rencontrées dans les systèmes d'imagerie par écho d'impulsion [16].

De plus, les formes d'onde pression-temps mesurées dans la région focale des lithotriteurs ne montrent pas de comportement imprévisible. Les pressions rencontrées dans la région focale de ces lithotriteurs peuvent être de l'ordre de 100 Mpa, et la forme des ondes de choc mesurées peut rester inchangée avec la diminution de la tension d'excitation ou de la tension appliquée aux électrodes du système électro-hydraulique. D'un autre côté, même si ces éléments ne représentent pas une preuve irréfutable venant à l'appui de la réponse linéaire du matériau PVDF, aucun élément probant ne démontre la présence d'une non-linéarité de la réponse en pression d'un **hydrophone** PVDF correctement conçu dans la gamme pouvant atteindre environ 70 MPa.

Annexe C (informative)

Corrections de charge électrique

C.1 Généralités

La sensibilité d'un **hydrophone** est souvent spécifiée comme la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**. Il s'agit de la sensibilité de l'hydrophone à l'extrémité de son câble lorsqu'il n'est pas connecté à une charge électrique. Lorsqu'une charge électrique spécifique (un oscilloscope, un amplificateur ou un câble supplémentaire, par exemple) est utilisée à la sortie de l'hydrophone, la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone peut être associée à la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de la manière suivante.

C.2 Corrections à l'aide de l'impédance complexe

Soit le cas général d'un hydrophone considéré comme un bipôle de l'impédance de sortie électrique complexe d'un hydrophone, $\underline{Z}_h$, connecté à une impédance de charge électrique complexe $\underline{Z}_L$. La sensibilité en bout de câble de l'hydrophone, M_L , lorsqu'il est connecté à la charge spécifiée, est associée à la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, M_c , par l'équation suivante:

$$M_L = M_c \sqrt{\frac{\operatorname{Re}(\underline{Z}_L)^2 + \operatorname{Im}(\underline{Z}_L)^2}{[\operatorname{Re}(\underline{Z}_L) + \operatorname{Re}(\underline{Z}_H)]^2 + [\operatorname{Im}(\underline{Z}_L) + \operatorname{Im}(\underline{Z}_H)]^2}} \quad (\text{C.1})$$

où $\operatorname{Re}(\)$ et $\operatorname{Im}(\)$ indiquent les parties réelles et imaginaires de l'impédance complexe correspondante. Souvent, la charge électrique peut être considérée comme une combinaison parallèle d'une résistance, R_L , et d'une capacité électrique, C_L , auquel cas $\operatorname{Re}(\underline{Z}_L)$ et $\operatorname{Im}(\underline{Z}_L)$ sont donnés par:

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

et

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

où

ω est la fréquence circulaire.

C.3 Corrections à l'aide des capacités électriques uniquement

Une simplification approfondie est possible si les impédances de l'**hydrophone** et de la charge peuvent être supposées capacitives. Cette hypothèse est souvent valide pour un **hydrophone** à des fréquences bien inférieures à la fréquence de résonance et pour des charges telles que des rallonges de câble. Dans ce cas, si C_H est la capacité électrique en bout de câble de l'hydrophone, y compris un câble intégré et un connecteur, l'équation ci-dessus est ramenée à

$$M_L = M_c \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (\text{C.4})$$

Annexe D (informative)

Étalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique d'exploration planaire

D.1 Présentation

La présente annexe propose une description détaillée de la méthodologie relative à l'étalonnage des hydrophones à l'aide de la technique d'exploration planaire. Elle donne des informations sur les options d'exploration mécanique de l'hydrophone et sur l'évaluation des sources importantes d'incertitude d'étalonnage.

D.2 Méthodologie d'exploration de l'hydrophone

Plusieurs méthodes permettent de balayer l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ dans le faisceau acoustique. La méthode la plus complète consiste à obtenir une matrice rectangulaire des points d'échantillonnage en déplaçant l'**hydrophone** dans un balayage de trame à deux dimensions. Dans ce cas:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [U_L(x_m, y_n, l, t)]^2 \Delta y \Delta x \quad (D.1)$$

où

M et N sont le nombre de points d'échantillonnage dans les directions y et x , respectivement; et

Δx et Δy sont les dimensions du pas dans les directions x et y , respectivement.

Un autre mode opératoire d'exploration est possible si le profil du faisceau provenant du transducteur peut être considéré comme à peu près symétrique du point de vue cylindrique. Dans ce cas, il est possible de réaliser un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau**. Il convient que ces balayages passent par le **centre du faisceau** acoustique et qu'ils soient espacés par incréments angulaires égaux. Par exemple, si deux balayages sont réalisés, il convient qu'ils soient espacés de 90° . Pour N **balayages diamétraux de faisceau**:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \left(\frac{\pi}{N}\right) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, s)]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s\right)^2 \right\} \quad (D.2)$$

où

r est la distance de chaque point de balayage par rapport au **centre du faisceau** acoustique (égal à $(y^2 + x^2)^{1/2}$ si le **centre du faisceau** est choisi à l'origine du système de coordonnées y, x);

Δr est la dimension du pas;

R_{1i} et R_{2i} sont les distances entre le **centre du faisceau** et les extrêmes du i -ième **balayage diamétral de faisceau**;

s est la distance entre le **centre du faisceau** acoustique et le point de balayage le plus proche.

Le second terme à droite de l'équation (D.2) représente la contribution à l'intégrale totale à partir du **centre du faisceau** acoustique.

NOTE L'équation (D.2) ne suppose pas qu'un point de balayage coïncide avec le **centre du faisceau** ou que des points de balayage sont équidistants du **centre du faisceau**.

D.3 Corrections et sources d'incertitude de mesure

D.3.1 Puissance totale

Dans le cas des mesures indiquées dans l'Article 10, l'**hydrophone** est placé à une distance de $z = l$ du transducteur. La puissance de sortie ultrasonore totale émise par le transducteur, P_0 , (en supposant que $z = 0$) doit donc être corrigée à l'aide de l'expression ci-dessous, pour tenir compte de l'atténuation du parcours de l'eau:

$$P(l) = P_0 \exp(-2\alpha z) \quad (D.3)$$

où

P_0 est la puissance de sortie ultrasonore totale émise par un transducteur;

$P(l)$ est la puissance totale dans le faisceau acoustique au niveau de l'hydrophone;

α est le coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes planes dans un milieu (en principe de l'eau).

L'Annexe E donne les valeurs de l'atténuation en fonction de la température (et de la fréquence) à utiliser dans l'équation (D.3).

La valeur fait l'objet de trois sources d'**incertitude** pour la puissance totale dans le champ acoustique au niveau de l'hydrophone $P(l)$, et il convient d'estimer chacune d'elles. En premier lieu, il existe une incertitude systématique dans la détermination de la puissance de sortie totale, P_0 , d'un transducteur normalisé ou d'un transducteur dont la puissance de sortie a été mesurée à l'aide de la technique de mesure par force de radiation (voir CEI 61161).

La seconde source d'incertitude résulte de possibles différences entre la puissance de sortie totale du transducteur lors de la procédure de balayage du faisceau et la puissance de sortie mesurée ou supposée (pour un transducteur normalisé). L'amplitude de cette incertitude peut être évaluée à partir des connaissances préalables en matière de stabilité du transducteur. Il convient de déterminer cette incertitude séparément pour chaque transducteur utilisé.

La source finale d'incertitude dans la détermination de la puissance totale résulte de la correction apportée à l'atténuation de l'eau. Le coefficient d'atténuation α/l^2 , qu'il convient de représenter à $\pm 1,7 \%$ à toutes les températures (voir [28] et [29]) et la détermination de la distance l entre le transducteur et l'hydrophone, font l'objet d'incertitudes. Cet écart peut être déterminé en mesurant le délai enregistré sur un oscilloscope entre l'excitation du transducteur ultrasonique et la réception du signal au niveau de l'**hydrophone**.

D.3.2 Signal reçu de l'hydrophone

D'une manière générale, l'amplitude du signal de l'**hydrophone** $U_L(x,y,l,t)$ est déterminé à l'aide d'un oscilloscope, d'un numériseur ou d'un autre système approprié, et il convient de déterminer l'incertitude de mesure de ce signal. L'incertitude dépend de la teneur en harmoniques du signal de l'**hydrophone**, de la réponse en fréquence de l'hydrophone et de la méthode utilisée pour déterminer le signal de l'**hydrophone**.

Il a été démontré que l'exploration planaire réalisée sur des ondes déformées se traduit par d'importantes erreurs d'étalonnage [30]. Ces erreurs sont plus importantes si la pression acoustique positive de crête est utilisée pour mesurer le signal de l'**hydrophone**. Elles le sont moins si la pression acoustique crête à crête ou de raréfaction de crête est utilisée.

D.3.3 Intégration

Il est fondamental que la technique d'exploration planaire offre un échantillonnage adapté du faisceau. Pour les balayages diamétraux de faisceau, et en supposant une symétrie cylindrique, une analyse analogue à celle de [28] peut permettre de démontrer que l'incertitude de la sensibilité de l'hydrophone suite à l'intégration numérique est inférieure à $\pm 1\%$. Pour cela, il doit exister au moins sept points d'échantillonnage entre (et parmi) les deux points à 6 dB sous la crête du profil du faisceau de pression acoustique (ou cinq points entre les points à 6 dB sur le profil de pression au carré). Si la technique du balayage de trame est utilisée, et si M et N de l'équation (D.1) sont choisis de sorte que les balayages de faisceau passant par le centre du faisceau dans les directions y et x contiennent au moins sept points d'échantillonnage entre (et parmi) les deux points à 6 dB sous la crête du profil du faisceau de pression acoustique, il peut être démontré que l'incertitude de la sensibilité de l'hydrophone suite à l'intégration numérique est inférieure à $\pm 1\%$. L'incertitude provoquée par un nombre fini de points d'échantillonnage doit être évaluée.

Dans le cas de **balayages diamétraux de faisceau**, l'évaluation de la symétrie cylindrique peut être soumise à essai par une analyse séparée des données issues de chaque partie radiale du balayage dans la formule

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}} [U_L(l, r_j)]^2 r_j \Delta r \quad (\text{D.4})$$

où

r_j est la distance entre le **centre du faisceau** et le point de balayage;

$j_{\max}$ est le numéro du point de balayage le plus éloigné d'un balayage radial.

NOTE Chaque balayage diamétral est supposé être décomposé en deux balayages radiaux (ou demi-balayages), les données étant analysées séparément.

La différence de pourcentage entre les valeurs maximale et minimale doit être déterminée, et la moitié de cette valeur doit être utilisée pour déterminer l'incertitude introduite suite à l'évaluation de la symétrie cylindrique lorsque des **balayages diamétraux de faisceau** sont utilisés.

D.3.4 Réponse directionnelle

La réponse directionnelle de l'**hydrophone** doit être corrigée par calcul, sauf si elle est imprévisible, auquel cas, le mode opératoire doit consister à modifier l'angle de l'**hydrophone** de manière à obtenir la tension de sortie maximale en chaque point du balayage. Il peut s'avérer inutile d'optimiser la rotation pour chaque position du balayage, plus particulièrement si l'écart entre les points d'échantillonnage implique une légère modification de l'angle d'incidence des ultrasons sur l'**hydrophone**. Le mode opératoire reposant sur les calculs est présenté ci-après. En premier lieu, il convient de déterminer la réponse directionnelle de l'**hydrophone** à la fréquence f . Soit la fonction de réponse directionnelle normalisée $D(\theta_1)$, où θ_1 représente l'orientation angulaire. Pour corriger la mesure mentionnée ci-dessus, le signal de l'**hydrophone** $U_L(x, y, l, t)$ doit être divisé par le facteur $D(\theta_1)$, où $\theta_1 = \arctan [(x^2 + y^2)^{1/2} / l]$.

Les méthodes permettant de déterminer la réponse directionnelle des **hydrophones** sont indiquées en 12.5.

D.3.5 Taille finie de l'hydrophone

L'incertitude provoquée par la taille finie de l'élément actif de l'**hydrophone** doit être évaluée. Un **hydrophone** répond à l'intégrale de la pression acoustique sur son élément actif. Par conséquent, il peut s'avérer nécessaire de corriger la moyenne spatiale [5], [7], [31], [32], [2]. Une évaluation de l'amplitude de cette correction doit être obtenue par calcul de la différence entre la pression acoustique en un point du champ et la moyenne de la pression sur la surface de l'**hydrophone** ([2], CEI 62127-1). Pour les besoins de ce calcul, la surface utile de l'**hydrophone** doit être utilisée pour définir l'étendue de la surface de l'**hydrophone**. La surface utile peut être déterminée à partir du **rayon efficace** de l'élément actif de l'**hydrophone**, lequel doit être déterminé par les modes opératoires indiqués en 12.5 [6]. Les contributions aux intégrations dans le processus d'exploration planaire (équation (10)) sont plus importantes à partir du centre du faisceau. Par conséquent, il suffit de déterminer l'incertitude et de procéder à une correction pour les zones proches du centre du faisceau acoustique. En principe, il est préférable de procéder à des mesures à une distance l du transducteur, de sorte que l'effet de la moyenne spatiale au centre du faisceau soit inférieur à 5 %.

D.3.6 Bruit

En général, l'**hydrophone** est balayé à une certaine distance ~~du centre~~ de l'**axe du faisceau** acoustique tant qu'un signal n'est pas observé au-dessus du bruit. Pour corriger l'intégrale du carré du signal de l'**hydrophone** de manière à tenir compte du bruit, le niveau de bruit doit d'abord être déterminé. Pour ce faire, l'ensemble du processus de balayage doit être répété avec le transducteur hors tension et le niveau efficace de bruit mesuré en chaque point. Le niveau efficace de bruit, $U_n(x, y, l)$, doit être soustrait des signaux mesurés de la manière suivante. Si la valeur moyenne du carré du signal de l'**hydrophone** est

$$\left[\overline{U_L'(x, y, l, t)} \right]^2 \quad (D.5)$$

la valeur moyenne du signal de l'**hydrophone** après correction pour tenir compte de la contribution du bruit est

$$\overline{U_L(x, y, l, t)}^2 = \left[\overline{U_L'(x, y, l, t)} \right]^2 - U_n^2(x, y, l) \quad (D.6)$$

Si l'**hydrophone** est placé à la distance correspondant à la limite du processus d'exploration planaire, un signal ultrasonore inférieur au niveau de bruit peut être présent. Dans ce cas, l'amplitude de la contribution depuis l'extérieur de la zone de balayage (ignorée dans l'intégration) doit être déterminée à l'aide d'un modèle théorique du faisceau acoustique. Dans la zone du **champ lointain** d'une source circulaire à piston plane, la pression en un point R est proportionnelle à:

$$2J_1(ka_t \sin \theta) / (ka_t \sin \theta) \quad (D.7)$$

où

k est le nombre d'ondes circulaires;

a_t est le rayon efficace ou géométrique du transducteur ultrasonique;

θ est l'angle entre la droite reliant le point R au centre du transducteur et l'**axe du faisceau**, voir également l'Article 4;

J_1 est une fonction de Bessel de premier ordre.

Ce modèle suppose un balayage sphérique et, par conséquent, la contribution ignorée doit être déterminée par l'intégration de cette répartition théorique (au carré) sur une zone sphérique définie à partir de l'arête de la zone d'exploration planaire et comparée à l'intégrale totale sur un hémisphère. La contribution à l'intégrale depuis l'extérieur de la zone de balayage en mode opératoire d'exploration planaire doit être supposée identique à celle obtenue à partir du modèle de balayage sphérique. Cette contribution doit être utilisée comme une correction apportée à l'intégration, et une incertitude égale à la correction doit être évaluée. Cette incertitude est en général limitée, comparé aux autres composants.

Il peut être préférable de procéder à un balayage jusqu'à un certain seuil inférieur au signal de crête au centre du faisceau acoustique (par exemple, 10 % [26] ou 5 % [33]). Dans ce cas, la contribution depuis l'extérieur de la zone de balayage sera significative, et le facteur de correction doit être déterminé à l'aide du même mode opératoire ci-dessus.

NOTE 1 Le rayon géométrique du transducteur ultrasonique peut être utilisé à la place du rayon efficace, si ce dernier n'est pas connu.

NOTE 2 La signification de la contribution en raison du bruit dépend de la méthode de mesure du signal de l'**hydrophone**.

D.3.7 Propagation non linéaire

La technique d'exploration planaire permet de déterminer la sensibilité d'un **hydrophone** à une fréquence particulière f . Il est important que l'onde ultrasonore ne soit pas déformée par l'introduction de composantes à haute fréquence due à la propagation non linéaire. Pour estimer l'importance de la propagation non linéaire par rapport à la méthode d'étalonnage de l'exploration planaire, deux modes opératoires sont présentés ici. Le choix de l'un ou l'autre dépend des modes opératoires de mesure particuliers et de l'**hydrophone** en cours d'étalonnage. En fait, les deux modes opératoires supposent que l'incertitude générée par une déformation non linéaire dépend de la perte d'amplitude de la composante de fréquence fondamentale dans la forme d'onde de la pression acoustique. Le premier mode opératoire suppose que l'amplitude de la seconde harmonique représente un certain pourcentage, δ , de l'amplitude fondamentale. Dans ce cas, l'erreur de pourcentage dans la détermination de la sensibilité de l'**hydrophone** pour $\delta < 30$ % est (voir D.4.5)

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100} \quad (D.8)$$

Bien qu'il s'agisse d'un mode opératoire simple, il risque d'être impossible de déterminer δ de manière fiable, en raison de la variation de sensibilité de l'**hydrophone** entre les fréquences fondamentales et celles de la seconde harmonique ou parce que, à des fréquences élevées, l'atténuation acoustique dans l'eau n'a pas été prise en compte.

Le second mode opératoire suppose que la propagation non linéaire peut être prévue dans le cas d'un transducteur ultrasonique à piston plan. Comme indiqué en D.4.5, pour le **champ lointain** d'un transducteur émettant une puissance acoustique totale P_0 dans des conditions à ondes entretenues, l'erreur de détermination de la sensibilité de l'**hydrophone** est d'environ:

$$P_0 (0,28 R + 0,065) f^4 a_t^2 10^{-20} \quad (D.9)$$

avec

$$R = l\lambda/\pi a_t^2 \quad (D.10)$$

où

f est la fréquence en hertz; et

a_t est le rayon efficace du transducteur ultrasonique en mètres.

Cette relation est précise si l'erreur est inférieure à 5 % et si l'atténuation est de nouveau ignorée (voir Annexe E).

Les évaluations ci-dessus reposent sur la supposition selon laquelle le signal à la fréquence de la seconde harmonique n'est pas détecté et que l'effet de l'atténuation sur la propagation non linéaire est limité. Si un **hydrophone** à réponse horizontale est utilisé, cette analyse surestime l'erreur.

L'incertitude doit être évaluée en utilisant la relation ci-dessus, et doit faire office de limite supérieure de l'erreur provoquée par la déformation de l'onde du signal de l'**hydrophone**. L'erreur doit être inférieure à 5 %.

D.3.8 Exploration planaire

D'un point de vue strict, il convient que l'écart entre les équations (10) et (6) se rapporte à une intégration sur une surface sphérique centrée au niveau du transducteur ultrasonique. L'erreur introduite par l'utilisation d'une exploration planaire en chaque point du balayage est proportionnelle à $\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$, où θ est l'angle entre l'**axe du faisceau** acoustique et la droite reliant le centre du transducteur ultrasonique au **centre de référence** de l'élément actif de l'**hydrophone**. Sous réserve que θ au niveau des bords de l'exploration planaire soit inférieur à environ 10°, l'incertitude par rapport à l'utilisation d'une exploration planaire est négligeable [28]. Si l'angle est plus important, l'incertitude doit être évaluée.

D.3.9 Intensité proportionnelle à la pression au carré

L'équation (5) suppose que l'**intensité instantanée** est proportionnelle au carré de la pression acoustique. Il est possible d'évaluer la différence entre l'**intensité instantanée** vraie, I , et l'intensité, I_p , déduite du carré de la pression acoustique sur l'axe d'un transducteur ultrasonique à piston plan circulaire grâce à l'équation suivante [9]:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{1 + \left(\frac{I}{a_t} \right) / \left[1 + \left(\frac{I}{a_t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{D.11})$$

Dans le cas des distances de mesure recommandées en 10.5.3 et de la gamme des diamètres du transducteur généralement rencontrés (6 mm à 25 mm), ce rapport varie par rapport à l'unité de moins de 1 %. Si les distances choisies sont inférieures à celles recommandées en 10.5.3, l'équation (D.11) doit être utilisée pour évaluer la contribution à partir de cette source d'incertitude.

D.4 Justification concernant la technique d'exploration planaire pour l'étalonnage des hydrophones

D.4.1 Généralités

Cet article donne un aperçu de l'écart et de la justification de certaines conditions et équations utilisées dans la technique d'exploration planaire.

D.4.2 Relation entre les rayons efficaces de l'hydrophone et du transducteur

Soit un transducteur à piston plan de rayon efficace a_t et un **hydrophone** de rayon efficace a_h placé à une distance l du transducteur.

L'onde de bord du transducteur sera incidente selon un angle au niveau de l'hydrophone donné par

$$\arcsin \left[\frac{a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (D.12)$$

Si l'hydrophone est supposé comporter une réponse directionnelle donnée par

$$2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta) \quad (D.13)$$

où k est le nombre d'ondes circulaires ($= 2\pi/\lambda$) et θ l'angle d'incidence, il convient que les ondes de bord soient incidentes selon un angle correspondant à moins de 1 dB sous la crête de la réponse directionnelle. Dans le cas de la réponse directionnelle, cela implique que $ka_h \sin(\theta) \leq 1$ (c'est-à-dire $[2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta)] ka_h \sin(\theta) = 1 \cong 0,88$). Par conséquent, cela est équivalent à

$$k a_h \sin(\theta) \leq 1 \quad (D.14)$$

ou

$$\frac{k a_h a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \leq 1 \quad (D.15)$$

D.4.3 Justification pour $a_t/l \leq 0,5$

Il peut être démontré [9] que l'intensité vraie à une distance axiale l d'une source à piston plane varie d'environ 6 % pour $a_t/l = 0,5$ par rapport à l'intensité déterminée en supposant la relation de la "pression au carré". Aux positions axiales plus proches du transducteur, l'intensité de "pression au carré" augmente rapidement comparée à l'intensité vraie. En conséquence, la limite de validité de l'équation (5) pour les besoins de la présente norme est prise comme $a_t/l \leq 0,5$.

D.4.4 Ecart de l'équation (D.2)

Soit la répartition des points $U_L(l, r)$ entre R_{1j} et R_{2j} , les distances entre le **centre du faisceau** et les extrêmes du l -ème **balayage diamétral du faisceau**. Soit s , la distance entre le **centre du faisceau** acoustique et le point de balayage le plus proche. Si chaque point est considéré comme contribuant à un anneau, l'intégration du **balayage diamétral** est donnée par

$$\sum_{r=R_{1j}}^{R_{2j}} \pi [U_L(l, r)]^2 r \Delta r \quad (D.16)$$

NOTE Les équations de somme présentées dans le présent article ne sont pas conformes à la convention mathématique habituelle. Ici, les limites données indiquent l'extrême de la somme. Entre ces extrêmes, le paramètre r de D.16 représente des valeurs discrètes correspondant aux descripteurs des points de balayage spécifiques.

Toutefois, le point central $U_L(l,s)$ ne contribue pas à un anneau centré sur l'**axe du faisceau** de la même manière que tous les autres points. Dans ce cas, il convient de considérer séparément les contributions des deux demi-cercles placés par rapport au point central. La contribution totale entre le point $U_L(l,s)$ et la somme diamétrale est

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] \quad (D.17)$$

Étant donné que l'équation (D.16) contient déjà un terme pour le point $U_L(l,s)$, il convient de corriger l'équation (D.16), donnée par la différence entre la contribution vraie du point central et le terme inclus dans l'équation (D.16), c'est-à-dire

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] - \pi [U_L(l,s)]^2 s \Delta r \quad (D.18)$$

simplifiée en

$$= \pi [U_L(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right] \quad (D.19)$$

Il s'agit du dernier terme de l'équation (D.2).

Si le point $U_L(l,s)$ correspond au centre du faisceau, $s = 0$ et les accolades de l'équation (D.2) sont simplifiées en

$$\sum_{r=R_{1j}}^{R_{2j}} [U_L(l,r)]^2 r \Delta r + [U_L(l,0)]^2 \frac{\Delta r^2}{4} \quad (D.20)$$

NOTE Étant donné que le terme à l'intérieur de la somme pour le point au centre du faisceau est nul [$r = 0$ pour $U_L(l,0)$], celui de droite correspond à la contribution du centre du faisceau.

D.4.5 Effet de la propagation non linéaire, D.3.7

L'écart de l'équation D.9 couvrant la propagation non linéaire est présenté ci-dessous.

Une approximation utile du champ d'amplitude fini d'un élément rayonnant à piston plan à des distances de l'ordre de, et supérieures à, la distance normalisée, $R = l \lambda / \pi a_t^2$ consiste à modéliser le profil du faisceau par une fonction gaussienne.

Pour les déformations légères, le rapport de l'amplitude de la composante de fréquence fondamentale de l'onde sur l'axe acoustique par rapport à l'amplitude en l'absence de déformation est donné par les équations (1) et (2) de [34]:

$$1 - \frac{\sigma^2}{8} \quad (D.21)$$

avec

$$\sigma = \left(\frac{7p_1 \pi^2 a_t^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (D.22)$$

où p_1 est l'amplitude de la pression acoustique au niveau de la face du transducteur ultrasonique et est liée à la puissance acoustique totale émise par un transducteur, P_0 , par

$$P_0 = \frac{\pi p_1^2 a_t^2}{4 \rho c} \quad (D.23)$$

L'amplitude de pression pour les positions par rapport à l'axe principal et les faibles amplitudes ($\sigma < 0,5$) est obtenue en multipliant σ par la fonction de directivité du transducteur [35] et, par conséquent, en supposant un profil Gaussien du faisceau, la racine carré de l'intégrale du carré de la pression acoustique par rapport à celle obtenue en l'absence de déformation est donnée par

$$1 - \frac{\sigma^2}{16} = \left\{ \frac{2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) \right] \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr}{2\pi \int \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (D.24)$$

et donc, l'erreur de pourcentage dans l'étalonnage d'un **hydrophone** est donnée par

$$100 \frac{\sigma^2}{16} = 100 \left(\frac{49 \pi^3 a_1^2 P_0}{\lambda^4 \rho c^3} \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2R} \right) \left(1 + R^2 \right) \left\{ \ln \left[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^2 \quad (D.25)$$

Si R est compris entre 0,5 et 3, cette formule peut être approchée par la formule (D.9).

Annexe E (informative)

Propriétés de l'eau

Tableau E.1 – Vitesse du son c [36], [37] et impédance acoustique spécifique, ρc , en fonction de la température, pour la propagation dans l'eau

Température °C	Vitesse du son c m s ⁻¹	Impédance acoustique spécifique ρc x10 ⁶ kg m ⁻² s ⁻¹
15	1 465,9	1,4647
16	1 469,4	1,4679
17	1 472,8	1,4710
18	1 476,1	1,4740
19	1 479,2	1,4769
20	1 482,4	1,4796
21	1 485,4	1,4823
22	1 488,3	1,4850
23	1 491,2	1,4875
24	1 494,0	1,4900
25	1 496,7	1,4923
26	1 499,4	1,4946
27	1 501,9	1,4967
28	1 504,4	1,4988
29	1 506,8	1,5008
30	1 509,2	1,5026
31	1 511,4	1,5044
32	1 513,6	1,5062
33	1 515,8	1,5078
34	1 517,8	1,5094
35	1 519,9	1,5108
36	1 521,8	1,5122
37	1 523,7	1,5136
38	1 525,5	1,5148
39	1 527,2	1,5160
40	1 528,9	1,5171

Coefficient d'atténuation pour la propagation dans l'eau

La valeur de α dans la plage des fréquences en mégahertz est proportionnelle à f^2 et doit être considérée à partir de l'ajustement polynomial en fonction de la température, T , en °C (valide dans la plage comprise entre 0 °C et 60 °C) [29]:

$$\begin{aligned} \alpha/f^2 &= (5,68524 \times 10^1 - 3,02545 \times 10^0 T \\ &+ 1,17416 \times 10^{-1} T^2 - 2,95430 \times 10^{-3} T^3 \\ &+ 3,96985 \times 10^{-5} T^4 - 2,11091 \times 10^{-7} T^5) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2}\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

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

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

Annexe F (informative)

Étalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique jusqu'à 40 MHz

F.1 Présentation

La présente annexe informative décrit l'état courant des méthodes absolues d'étalonnage des **hydrophones** à ultrasons adaptés aux fréquences supérieures à 15 MHz. La base de certaines méthodes utilisées dans le passé, et de celles en cours d'évaluation, est brièvement décrite à l'Article F.2. Ces méthodes reposent sur la propagation non linéaire des ondes planes et sur l'interférométrie optique. La dernière méthode est particulièrement intéressante, car les étalonnages peuvent être directement identifiés par rapport à des étalons primaires de mesure de longueur. La présente annexe décrit également les progrès réalisés en matière de mise en œuvre de méthodes d'étalonnage absolues reposant sur l'interférométrie optique réalisées dans deux laboratoires nationaux normalisés. La différence fondamentale entre les deux mises en œuvre, appelées I et II en F.2.3.1 et F.2.3.2, repose sur la disposition des faisceaux acoustique et laser. Dans la mise en œuvre II, par opposition directe à la mise en œuvre I, le faisceau optique traverse le faisceau acoustique.

NOTE L'étalonnage "absolu" de l'**hydrophone** s'entend ici dans le sens de "sans référence à un autre **hydrophone**". Il est parfois appelé étalonnage "principal". Par ailleurs, dans la pratique, les **hydrophones** sont souvent étalonnés suivant un mode opératoire "secondaire" ou "de substitution", ce qui implique une comparaison de sensibilité avec un **hydrophone** de référence étalonné. L'**hydrophone** de référence lui-même peut avoir été étalonné en termes "absolus" ou par rapport à un autre **hydrophone** de référence, et ainsi de suite. De toute évidence, il existe deux modes opératoires fondamentaux différents: l'un permettant de réaliser un étalonnage absolu de l'**hydrophone** et l'autre de comparer la sensibilité de deux **hydrophones**. La présente annexe traite du premier mode opératoire. Le dernier mode opératoire est présenté en détail dans l'Article 12. Il convient de noter qu'un étalonnage de substitution implique en général les deux modes opératoires, et que l'utilisateur intéressé se reporte à l'Article 12 et à la présente annexe (et que les **incertitudes** liées aux deux modes opératoires fondamentaux contribuent à l'**incertitude** de l'étalonnage final en cas d'étalonnage de substitution).

F.2 Position actuelle

F.2.1 Méthode reposant sur la propagation magnomique ou non linéaire

Dans le passé, des travaux ont été entrepris pour étalonner des **hydrophones** à des fréquences pouvant atteindre 100 MHz par la méthode dite "magnomique" ou du "modèle empirique de propagation non linéaire" [34], [38], [39], [40], [41], [42]. La méthode est décrite en [34]. Il s'agit d'utiliser un modèle de propagation non linéaire pour les ondes planes et d'exploiter le fait selon lequel, pour un transducteur à piston de diamètre relativement important, un déclenchement périodique adapté du signal acoustique peut isoler la composante d'onde plane de l'onde de bord émanant du bord du piston. A des amplitudes de pression élevées, ces ondes planes subissent une déformation d'amplitude finie, générant un champ acoustique riche en harmoniques. Un modèle théorique de propagation d'onde plane permet de prévoir la déformation de ces ondes sonores et, en comparant les prévisions à des mesures réalisées à proximité de la face du transducteur (sans déformation) et à une distance connue le long de l'axe (déformé et enrichi en harmoniques par propagation non linéaire), un étalonnage de l'**hydrophone** peut être obtenu à chaque fréquence d'harmonique.

Les résultats obtenus par cette méthode ont été prometteurs et confirmés par la réponse théorique de deux **hydrophones** à membrane. Néanmoins, elle comporte quelques inconvénients. En premier lieu, elle dépend profondément du modèle de propagation utilisé. En second lieu, elle dépend des performances du transducteur utilisé pour générer le champ acoustique. En raison des défauts du transducteur, le champ généré peut dévier de manière significative des ondes planes souhaitées, produisant d'importantes **incertitudes** d'étalonnage.

Les méthodes employant un transducteur à focalisation de diamètre plus réduit pour générer des harmoniques dans un plan focal pallient ces inconvénients. Les champs mesurés sont plus aisément reproductibles à une distance de longueur focale connue présentant un lobe de faisceau principal bien défini. Le gain focal du transducteur peut offrir des pressions plus élevées remplies d'harmoniques à une distance plus courte que celles utilisées pour l'onde plane. Des transducteurs à focalisation adaptés avec des propriétés uniformes sont disponibles dans le commerce.

F.2.2 Interférométrie optique

Dans la méthode d'étalonnage reposant sur l'interférométrie optique, le champ acoustique généré par un transducteur est détecté à l'aide d'une fine membrane en plastique (appelée pellicule ou feuille) métallisée sur un côté pour permettre la réflexion optique. La pellicule est suffisamment fine pour être transparente du point de vue acoustique. Elle suit le mouvement de l'onde acoustique, son déplacement étant mesuré par interférométrie optique, et la pression acoustique étant déduite du déplacement mesuré. L'**hydrophone** à étalonner remplace la pellicule, le centre acoustique de l'**hydrophone** étant placé au même endroit dans le champ acoustique soumis au faisceau laser. L'**hydrophone** est ensuite étalonné en mesurant la tension de sortie correspondant à la pression acoustique connue.

Clairement, une méthode d'étalonnage valable implique impérativement une pression acoustique suffisante pour permettre au signal de l'**hydrophone** de présenter un rapport signal-bruit acceptable à la fréquence considérée (jusqu'à 40 MHz). Toutefois, l'interférométrie optique permet réellement de détecter le déplacement acoustique, et cela implique impérativement un rapport signal-bruit acceptable. Dans le cas d'une onde plane, l'amplitude de la pression acoustique, p_0 , est donnée par

$$p_0 = \rho c \omega \zeta \quad (\text{F.1})$$

où

ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau);

c est la vitesse du son dans le milieu;

ω est la fréquence circulaire;

ζ est l'amplitude du déplacement acoustique, la différence de phase entre la pression et le déplacement étant ignorée.

Ignorer la différence de phase entre la pression et le déplacement signifie que, pour une pression acoustique donnée, l'amplitude du déplacement est réciproquement liée à la fréquence, de sorte que des pressions acoustiques élevées sont nécessaires pour générer un déplacement mesurable aux fréquences d'au moins 40 MHz. Il convient de noter que ces mises en œuvre de la méthode décrite ci-dessous utilisent des transducteurs à focalisation afin de répercuter l'augmentation de la pression acoustique.

F.2.3 Mises en œuvre à haute fréquence de l'interférométrie optique

F.2.3.1 Mise en œuvre I

F.2.3.1.1 Système de mesure

La technique d'étalonnage optique repose sur la mesure du déplacement d'une membrane placée à la surface d'un liquide contenant un transducteur (Figure F.1). D'une manière générale, l'onde sonore générée est incidente et déplace la membrane, lequel déplacement est mesuré à l'aide d'un interféromètre de Michelson [43], [44], [45], [46]. Cet appareil contient un laser faisant office de source lumineuse et un séparateur de faisceau polarisant permettant de diviser et de combiner le champ optique (Figure F.1). Dans le bras de mesure, la lumière est concentrée sur la feuille, laquelle est revêtue d'une couche d'aluminium afin d'améliorer la réflexion optique. La concentration garantit un petit diamètre de point pour une résolution spatiale suffisante.

Un système de photodétection équilibré à largeur de bande $BW \approx 100$ MHz permet de détecter le champ optique de sortie. Il est composé de deux photodiodes et d'un amplificateur de transimpédance différentiel, A_V , supprimant le bruit d'amplitude et augmentant le courant photoélectrique. L'amplificateur de transimpédance est associé à un second amplificateur V doté d'une impédance d'entrée élevée et qui peut être utilisé comme un amplificateur d'**hydrophone** (voir ci-après). L'interféromètre est stabilisé [44] par une boucle d'asservissement à une fréquence de gain unité d'environ 100 Hz. Dans ce cas, le déplacement est obtenu à partir des courants photoélectriques mesurés par

$$\zeta = \frac{U_S \lambda_I}{2\pi TF \hat{U}} \frac{V(f=0)}{V(f)} \quad (\text{F.2})$$

où

λ_I est la longueur d'onde optique (longueur d'onde de la lumière dans le vide);

TF est le facteur de transmission acoustique du déplacement à travers la feuille;

U_S est la tension du signal;

$\hat{U}$ est la tension crête à crête d'une frange complète de l'interféromètre mesurée à la sortie de l'amplificateur V , comportant un gain dépendant de la fréquence $V(f)$.

La tension de sortie, U_S , est détectée par un oscilloscope numérique, c'est-à-dire dans le domaine temporel à largeur de bande importante ($BW > 100$ MHz). Pour obtenir un rapport signal-bruit suffisamment élevé, un transducteur à large bande piézoélectrique focalisé est utilisé. Il est fourni avec un ensemble de fréquences données, et les données de mesure sont acquises immédiatement après les premiers signes d'ultrasons lorsque l'état stable est atteint. Cela permet d'éviter les perturbations par réflexion sur les parois du réservoir.

L'alignement est réalisé à l'aide d'une translation sur trois axes et d'une rotation autour de deux axes. Le point du laser est ajusté au niveau du foyer perpendiculaire à l'axe de faisceau, qui est déterminé par des mesures de pression à deux dimensions à différentes distances du transducteur. La valeur maximale de la sortie de l'interféromètre, le signal acoustique réfléchi et le délai entre l'impulsion d'excitation et le signal de sortie sont des critères suffisants d'alignement par translation. L'angle entre la feuille et la direction de propagation du son est ajusté en prenant comme référence le faisceau laser aligné.

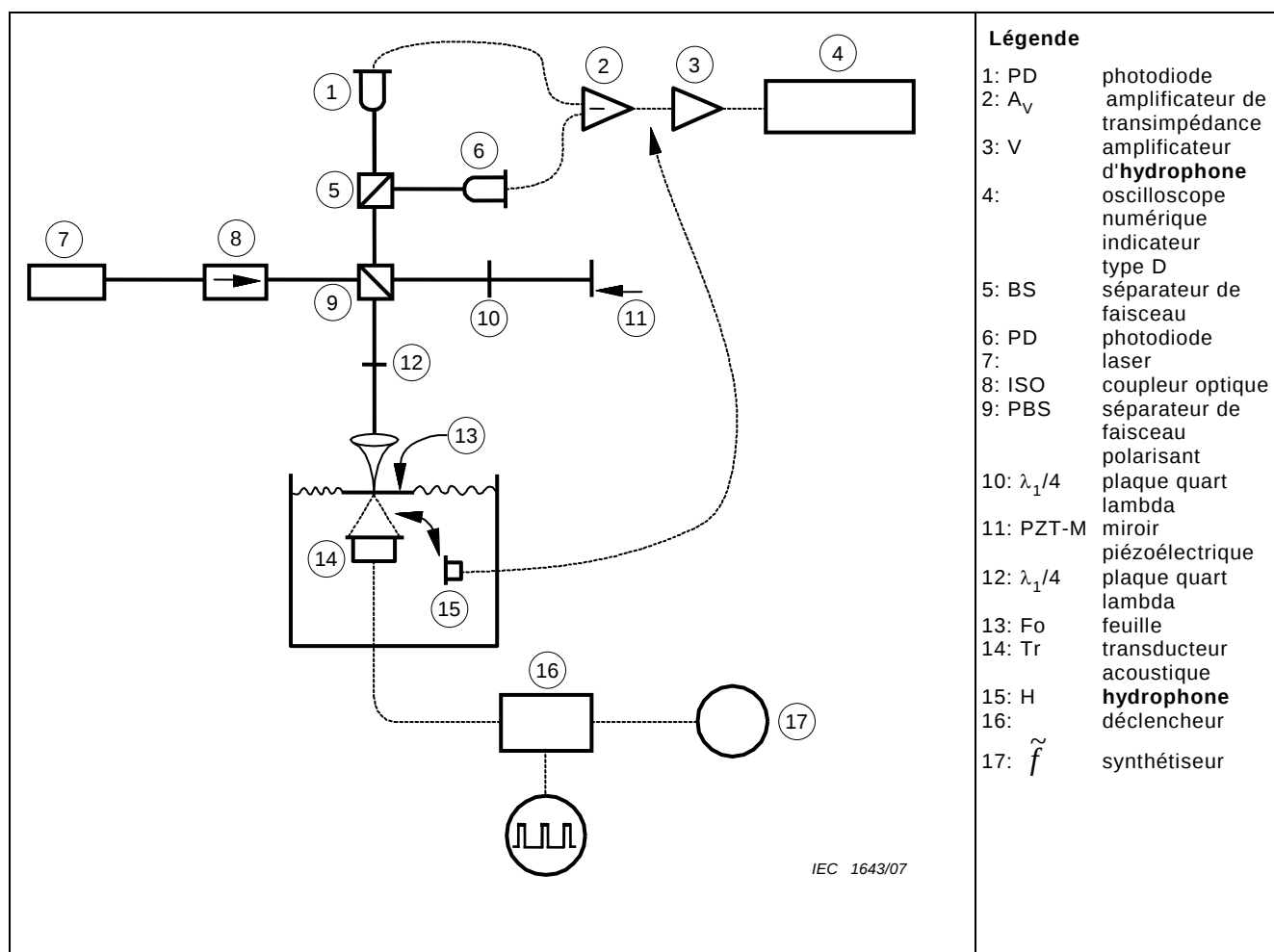


Figure F.1 – Configuration expérimentale de la technique de la feuille interférométrique

Après le stockage des données de référence, la feuille est retirée et l'**hydrophone** considéré fixé à la même place du point laser. Une certaine quantité d'eau est ajoutée pour immerger l'**hydrophone**. Par ailleurs, le transducteur peut être pivoté (voir Figure F.1) pour plus de simplicité. L'**hydrophone** est connecté à l'entrée de l'amplificateur V. Ensuite, la mesure est répétée dans des conditions d'excitation identiques.

La **sensibilité en bout de câble**, M_L , est obtenue par

$$M_L = \frac{1}{\omega c \rho V(f=0)} \frac{2 \pi T F \hat{U}}{\lambda_1} \frac{U_H}{U_S} \quad (\text{F.3})$$

où

- c est la vitesse du son dans l'eau;
- ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau);
- U_H est la tension de la mesure de l'**hydrophone**;
- $\omega (= 2\pi f)$ est la fréquence circulaire du champ acoustique.

Ici, la sortie de l'**hydrophone** est chargée électriquement par l'impédance d'entrée de l'amplificateur V.

F.2.3.1.2 Correction des données

La détermination de la **sensibilité en bout de câble**, M_L , est influencée par trois effets systématiques, dont les données doivent être corrigées à l'aide de modèles théoriques, comme suit.

F.2.3.1.3 Diamètre de la tâche

Il n'est pas possible de supposer que l'**hydrophone** et le faisceau laser concentré sur la feuille sont des détecteurs de tâche, et il convient de tenir compte des effets de la moyenne spatiale. Pour décrire de manière quantitative cet effet [45], le transducteur est considéré comme un piston planaire. La distribution du déplacement est obtenue à partir de la solution de l'intégrale de Rayleigh [46], et toutes les valeurs moyennes mesurées peuvent être associées aux valeurs de pression de crête [45].

F.2.3.1.4 Effets de plusieurs passages dans la feuille

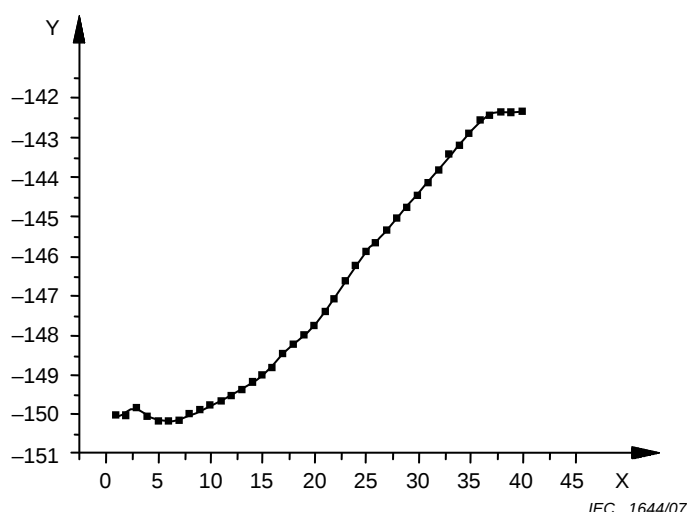
Au foyer ultrasonore, le fluide est couvert par une feuille revêtue afin d'améliorer la réflexion optique. Le champ acoustique incident est partiellement réfléchi dans la feuille et la couche métallique, et cette interférence de plusieurs faisceaux influence le déplacement de la feuille. Étant donné que le front de phase au foyer d'un faisceau sonore est pratiquement plat, un simple modèle de résonance [45] utilisant des ondes planes peut être appliqué pour décrire de manière quantitative l'erreur systématique due à cet effet. Cela donne un facteur de transmission acoustique, TF , pour le déplacement, qui est inséré dans les équations (F.2) et (F.3).

F.2.3.1.5 Réponse en fréquence du photodétecteur

Contrairement à la dépendance à la fréquence du gain d'amplificateur, $V(f)$, se produisant dans les mesures, la réponse en fréquence du photodétecteur influence la **sensibilité en bout de câble**, M_L . La fonction de transfert a été mesurée à l'aide d'un oscillateur optique et toutes les données de l'interféromètre ont été corrigées.

F.2.3.1.6 Résultats

A titre d'exemple, la Figure F.2 illustre la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, M_C , d'un hydrophone à membrane coplanaire d'une épaisseur de couche de 25 μm .



Légende

X f (MHz)

Y M_c (dB re 1V/Pa)

Figure F.2 – Sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, M_c , d'un hydrophone à membrane coplanaire

L'incertitude de cette mesure était dépendante de la fréquence. Entre 1 MHz et 5 MHz, 9,5 %, et dans la plage comprise entre 5 MHz et 20 MHz, 8 % ont été évaluées. Ces valeurs sont passées à 10 % à 30 MHz et 12 % à 40 MHz. Les valeurs d'incertitude données utilisent un facteur de couverture de $k = 2$ et offrent un niveau de confiance de 95 %.

F.2.3.2 Mise en œuvre II

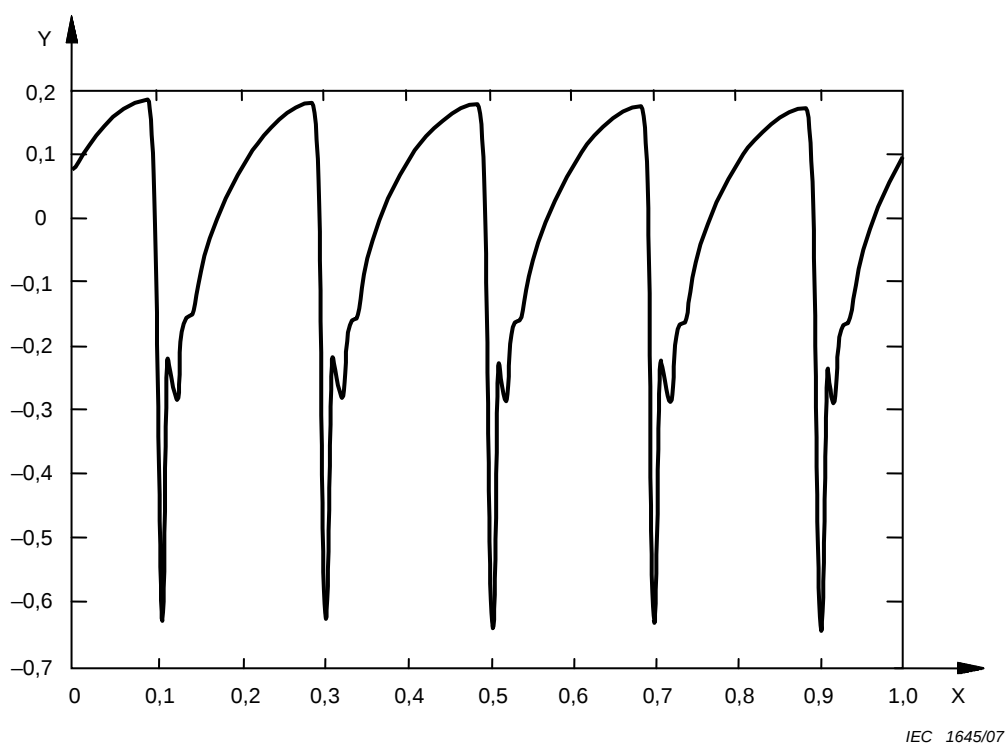
F.2.3.2.1 Système de mesure

La méthode interférométrique optique, développée comme principale méthode normalisée d'étalonnage des **hydrophones** à ultrasons dans la plage de fréquences comprise entre 500 kHz et 20 MHz, a été précédemment décrite en détail [47] et une brève description est présentée ici. La technique a été validée pour des fréquences supérieures à 500 kHz par des comparaisons au niveau international entre des laboratoires nationaux normalisés [48], et s'est imposée comme une norme principale. Une bonne compréhension des sources d'**incertitude** d'étalonnage s'est développée, les **incertitudes** globales typiques pour des fréquences pouvant atteindre 20 MHz représentant 3 % ou 4 % lorsqu'elles sont exprimées à un niveau de confiance de 95 %.

Les pellicules utilisées pour les mesures sont des membranes en polyéthylène téréphtalate (PET) de 3,5 μm et 5 μm d'épaisseur revêtues d'une couche d'or de 25 nm. Étant donné que le faisceau optique traverse le faisceau acoustique dans cette disposition, il est possible que les deux faisceaux interagissent. A la source de cette interaction se situe la modification de l'indice de réfraction due aux modifications locales de densité du milieu et des parties en compression et en raréfaction de l'onde acoustique. Cela comporte des implications pour l'interaction acousto-optique décrite en F.2.3.2.4.4.

F.2.3.2.2 Champ acoustique

Les étalonnages sont réalisés à l'aide de transducteurs à focalisation de fréquence centrale nominale de 5 MHz. Deux longueurs focales sont utilisées pour que certaines **incertitudes** systématiques associées à l'étalonnage (acousto-optique, moyenne spatiale) puissent être étudiées. Les positions focales nominales des transducteurs sont 50 mm et 150 mm. Elles sont menées à l'aide de giclées de tonalité d'amplitude suffisante pour générer des ondes fortement déformées non linéaires à la position du champ considérée (le foyer). De cette manière, et comme l'illustre la Figure F.3 pour un **hydrophone** à membrane coplanaire de 9 μm de 0,5 mm, les harmoniques reçues de la forme d'onde de l'**hydrophone** peuvent être détectées jusqu'à 100 MHz. Il convient de noter l'approximation d'une forme d'onde en dent de scie idéale, l'amplitude des harmoniques successives montrant une dépendance proche de $1/n$ en amplitude, où n est le rang d'un harmonique. Même si les transducteurs à focalisation doivent être appliqués pour générer des pressions acoustiques suffisantes, leur utilisation a des conséquences sur les corrections, et particulièrement la moyenne spatiale, où la largeur de faisceau des harmoniques plus élevées est de plus en plus étroite (voir F.2.3.2.4.3).



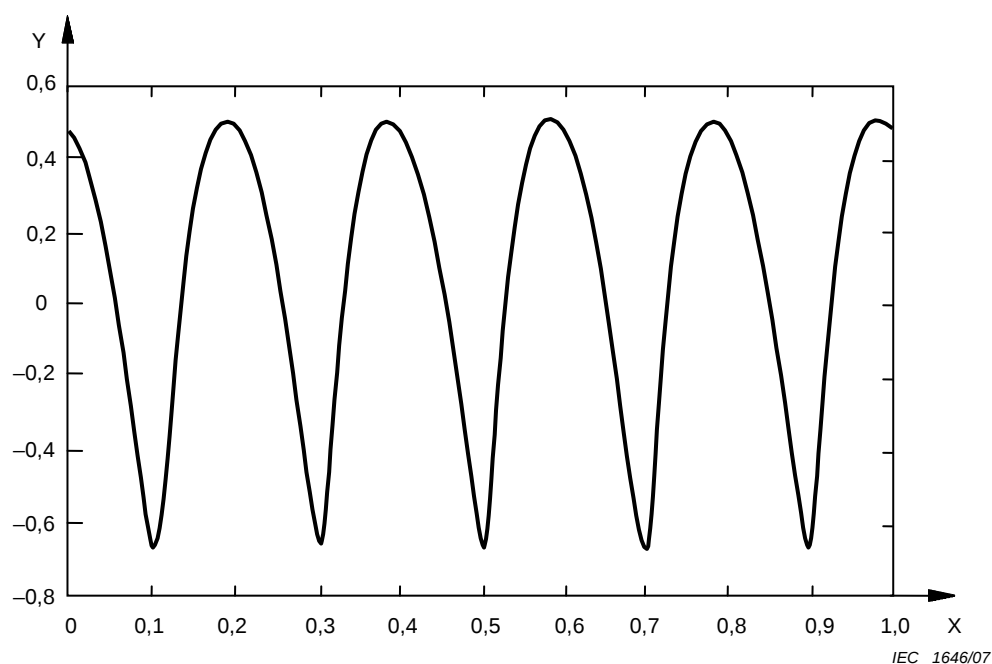
IEC 1645/07

Légende

X durée (microsecondes)

Y amplitude (volts)

Figure F.3 – Forme d'onde d'hydrophone générée par un hydrophone à membrane coplanaire de 9 μm placé au foyer d'un transducteur de 5 MHz (longueur focale de 51 mm)

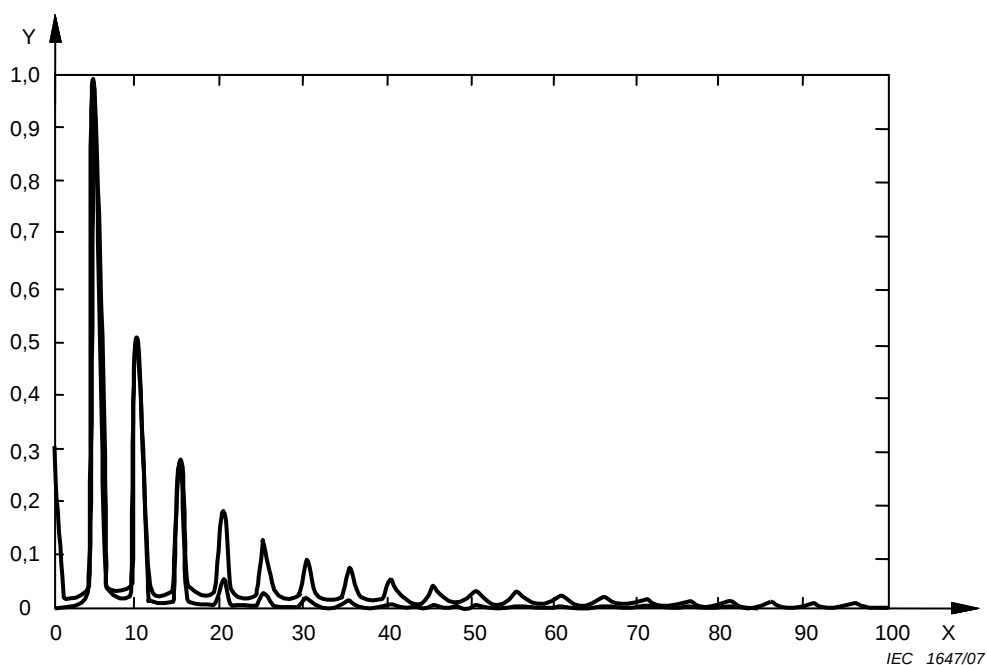


Légende

X durée (microsecondes)

Y amplitude (volts)

Figure F.4 – Forme d'onde (déplacement) de l'interféromètre générée avec la pellicule placée au foyer du transducteur de 5 MHz (position focale de 51 mm)

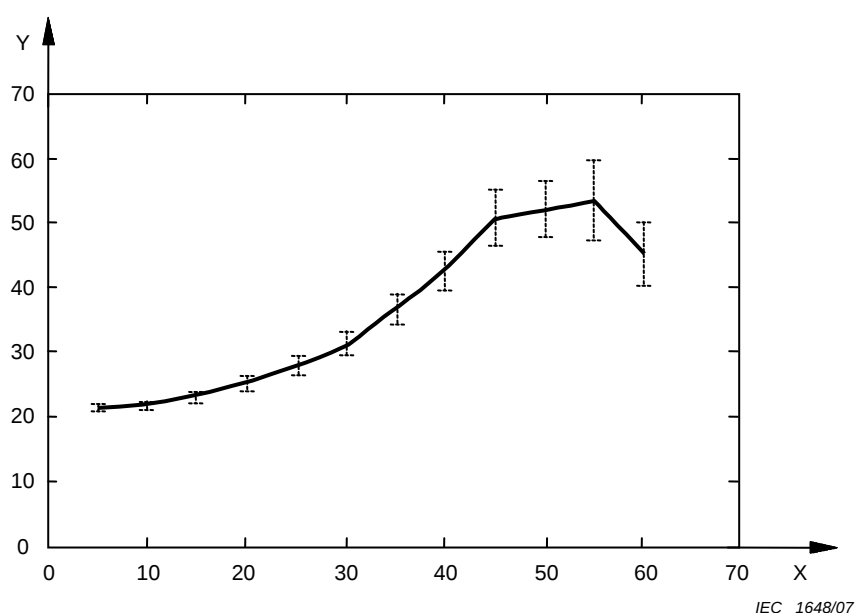


Légende

X fréquence (MHz)

Y amplitude normalisée

Figure F.5 – Spectre de fréquences de la forme d'onde de déplacement (courbe inférieure) et forme d'onde de déplacement différenciée (courbe supérieure)



Légende

X fréquence (MHz)

Y sensibilité (nV/Pa)

Figure F.6 – Sensibilité du diamètre d'un élément actif de 0,2 mm d'un hydrophone à membrane à deux feuilles de 9 μ m déterminée à intervalles de 5 MHz dans la plage de fréquences comprise entre 5 MHz et 60 MHz

F.2.3.2.3 Etalonnages

La Figure F.4 illustre la forme d'onde de déplacement générée par la pellicule placée au foyer, à 51 mm du transducteur de 5 MHz focalisé. Noter l'absence de déformation claire de la forme d'onde. Cela est confirmé par le calcul de la transformée de Fourier (courbe inférieure de la Figure F.5, c'est-à-dire la forme d'onde de déplacement). La différenciation du spectre de déplacement donne le spectre de la pression, également illustré à la Figure F.5 (forme d'onde de déplacement différenciée), où les composantes de fréquence jusqu'à 60 MHz peuvent désormais être aisément lisibles. En comparant la sortie de l'**hydrophone** placé au même endroit dans le champ avec le spectre de la pellicule différencié, l'**hydrophone** peut être étalonné dans la plage de fréquences considérée. La Figure F.6 illustre les résultats de l'étalonnage déduits pour un **hydrophone** à membrane à deux feuilles de 9 μ m dont le diamètre de l'élément actif est de 0,2 mm. La résonance théorique du dispositif dans sa réponse en fréquence à 55 MHz peut être clairement mise en évidence dans les résultats de l'étalonnage. Les **incertitudes** données sur le point sont aléatoires et s'altèrent au-dessus de 40 MHz environ, le rapport signal-bruit du contenu du signal de la pellicule diminuant à ces fréquences élevées.

F.2.3.2.4 Corrections de l'étalonnage et sources d'incertitude de mesure

Dans ce paragraphe, les sources les plus significatives d'**incertitude** de mesure liées à l'étalonnage seront brièvement présentées.

F.2.3.2.4.1 Réponse en fréquence de l'interféromètre

La réponse en fréquence de l'interféromètre est essentiellement celle des photodiodes à avalanche et de l'amplificateur. Elle a été mesurée dans la plage comprise entre 1 kHz et 20 MHz dans le passé, à l'aide d'un étalonneur de réponse en fréquence développé spécifiquement à cet effet [49]. L'extension de la plage de fréquences d'application de l'interféromètre jusqu'à 60 MHz impliquait d'apporter des modifications à l'étalonneur de fréquence. Grâce à l'étalonneur de fréquence modifié, la réponse en fréquence de l'interféromètre a été déterminée jusqu'à 100 MHz. Les **incertitudes** d'étalonnage de la réponse en fréquence ont varié de 3,5 % (20 MHz) à 4,3 % (40 MHz).

F.2.3.2.4.2 Coefficient de transmission de la pellicule

Les résultats de l'étalonnage doivent être corrigés pour les propriétés de transmission des pellicules. Deux approches permettant de déduire cette correction sont possibles, l'une théorique et l'autre expérimentale. Grâce à une simple théorie acoustique de propagation des ondes planes à travers des couches de matériau dissemblable, un modèle a été développé pour calculer le coefficient de transmission dépendant de la fréquence des pellicules. Ce modèle suppose que cette atténuation du faisceau acoustique dans la couche en or de 25 nm d'épaisseur est négligeable. En outre, une méthode expérimentale permettant de déterminer le coefficient de transmission dans la plage comprise entre 2 MHz et 60 MHz a été conçue. Elle repose sur une méthode de substitution faisant appel à un champ déformé non linéaire généré par un transducteur fondamental de 2 MHz. La pellicule est placée entre le transducteur et un **hydrophone** (très proche de ce dernier), puis son coefficient de transmission est déterminé. Par une combinaison de théorie et de mesure, une correction dépendante de la fréquence est appliquée, dont l'**incertitude** varie de 1 % à 5 MHz à 2 % à 40 MHz.

F.2.3.2.4.3 Correction de la moyenne spatiale

Les largeurs de faisceau étroites des harmoniques générées par les transducteurs de 5 MHz focalisés impliquent de corriger la moyenne spatiale de la répartition de la pression sur l'élément actif de l'**hydrophone**. Une étude expérimentale de la moyenne spatiale a été menée en déterminant des points de faisceau au niveau du foyer du transducteur, à l'aide de l'**hydrophone** à membrane à deux feuilles de 9 µm dont le diamètre de l'élément actif est de 0,2 mm, les transformées de Fourier des formes d'onde étant déterminées de manière à en déduire les largeurs de faisceau des harmoniques. Il est supposé qu'aucune correction de la moyenne spatiale n'est nécessaire pour le point laser, dont le diamètre est de 0,1 mm. Les **incertitudes** des corrections de la moyenne spatiale déduites à l'aide de cette évaluation ont varié de 1 % à 5 MHz à 6 % à 40 MHz.

F.2.3.2.4.4 Interaction acousto-optique

Étant donné que le faisceau optique traverse le faisceau acoustique dans la disposition expérimentale utilisée, il est possible que les deux faisceaux interagissent. Cela signifie que le déplacement mesuré par l'interféromètre n'est pas le déplacement vrai de la membrane de la pellicule, puisque la longueur du chemin optique change en raison du mouvement de la pellicule et de la variation de l'indice de réfraction le long du faisceau laser. Pour tenir compte de cet effet, il convient de procéder à une correction relativement importante du déplacement mesuré, cela étant possible grâce à un indice de réfraction efficace pour l'eau. La précision de la correction a été validée pour le régime d'onde plane linéaire utilisé pour les étalonnages à basse fréquence [47], mais les champs focalisés non linéaires à amplitude élevée utilisés se traduisent par une augmentation de l'**incertitude** à partir de l'indice de réfraction. L'effet acousto-optique fait l'objet d'une évaluation continue, mais les travaux réalisés jusqu'à présent indiquent que la contribution à l'**incertitude** de la variation de l'indice de réfraction ne dépasse pas 1 % dans la plage de fréquences considérée. Il a été évalué que la contribution de l'onde non plane à l'effet varie de 0,5 % à 5 MHz à 3 % à 40 MHz.

F.2.3.2.5 Incertitude globale de mesure

Une évaluation de l'**incertitude** de la méthode d'interférométrie optique de l'étalonnage à haute fréquence a été publiée [50], les estimations des **incertitudes** de mesure étendues variant de 7 % à 20 MHz à 11 % à 40 MHz.

Annexe G (informative)

Concepts de forme d'onde

G.1 Présentation

L'étalonnage d'un **hydrophone** repose sur l'application d'un champ ultrasonique particulier et stable. Les caractéristiques de ce champ appliqué peuvent varier, en fonction de la forme d'onde électrique appliquée au transducteur, des caractéristiques du transducteur (plat, planaire ou focalisé) et de sa position dans le champ de pression ultrasonique à partir duquel réaliser l'étalonnage. Les différents concepts sont applicables et sont décrits en détail aux Articles G.1 à G.5, puis récapitulés dans le Tableau G.1.

**Tableau G.1 – Concepts de forme d'onde temporelle
et de position de l'hydrophone décrits dans la présente annexe**

Concepts de forme d'onde temporelle		Concepts de position de l'hydrophone	
a	Giclée de tonalité à bande étroite	A	Position proche du champ
b	Forme d'onde à large bande résultant de la giclée de tonalité à bande étroite utilisant une propagation non linéaire	B	Position en champ lointain
c	Impulsion à large bande	C	Position en champ lointain avec un long trajet de propagation pour obtenir une déformation non linéaire
d	Balayage de fréquence à ondes entretenues avec spectrométrie de temporisation	D	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (propagation linéaire)
e	Analyse de la fréquence de déclenchement périodique (TGFA) du balayage de fréquence à ondes entretenues	E	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (propagation non linéaire)

En outre, l'Article G.5 présente les considérations particulières lorsque les étalonnages sont réalisés à proximité de la face d'un transducteur planaire (concept A de la position de l'hydrophone, décrit en G.4.1).

G.2 Forme d'onde temporelle, concepts de fréquence et positionnement de l'hydrophone pour des étalonnages par comparaison des hydrophones

Tous les résultats obtenus conformément à cet article se rapportent à une certaine fréquence ultrasonore. Ils sont fonction de la fréquence et peuvent être appréhendés comme des amplitudes dans un spectre de fréquences.

Les concepts liés à la forme d'onde temporelle et à l'identification de la fréquence sont les suivants:

- a. giclée de tonalité à bande étroite;
- b. forme d'onde à large bande résultant d'une giclée de tonalité à bande étroite après propagation non linéaire;

- c. impulsion à large bande;
- d. balayage de fréquence à ondes entretenues avec spectrométrie de temporisation (TDS). (voir Annexe H.)
- e. balayage de fréquence à ondes entretenues avec TGFA [39].

Les concepts liés à la position de l'**hydrophone** dans le champ ultrasonique sont les suivants:

- A. position en champ proche;
- B. position en **champ lointain**;
- C. position en **champ lointain** avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (en association avec le concept B de forme d'onde temporelle).

S'il s'agit d'un transducteur circulaire plan, il est en général possible d'affirmer que le champ est composé d'une onde directe plane et d'une onde de bord non plane. Conformément au concept A relatif à la position de l'hydrophone, l'**hydrophone** est placé assez proche du transducteur, auquel cas, compte tenu de leurs différentes longueurs de trajet de propagation, les deux composantes de l'onde peuvent être séparées l'une de l'autre. En choisissant un temps de commutation approprié, l'impulsion ultrasonore directe et plane peut être relevée. Par ailleurs, conformément aux concepts B et C liés à la position de l'hydrophone, l'**hydrophone** est placé sur l'**axe du faisceau** dans le champ lointain. Dans cette zone, la différence de trajet des deux composantes de l'onde est relativement limitée. Par conséquent, elles se touchent inévitablement, mais le champ qui en résulte est pratiquement plat, la principale restriction étant un diamètre limité du lobe central du champ.

- D. position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (excitation à faible amplitude ou linéaire);
- E. Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (excitation à amplitude élevée).

Dans le concept D ou E lié à la position de l'hydrophone, le transducteur source est focalisé, de sorte que la forme du faisceau au foyer géométrique est identique à celle obtenue dans le **champ lointain** d'un transducteur non focalisé. Pour le concept D lié à la position de l'hydrophone, un transducteur à focalisation faisant office de source présente l'avantage d'offrir des conditions analogues à celles du concept B, avec un trajet plus court dans des conditions d'excitation linéaire, ce qui permet de réduire les effets d'atténuation. Pour le concept E lié à la position de l'hydrophone, le champ d'un transducteur à focalisation à son foyer géométrique permet d'obtenir une déformation non linéaire par l'intermédiaire d'une excitation à tension d'amplitude élevée. Le concept E présente l'avantage de réduire l'atténuation grâce au trajet plus court des composantes harmoniques fondamentales ou plus élevées de la forme d'onde de pression, la déformation non linéaire étant obtenue par l'augmentation de l'amplitude de pression provoquée par le gain focal du transducteur.

NOTE Certaines combinaisons des concepts de forme d'onde temporelle et des concepts de position de l'**hydrophone** sont privilégiées dans la documentation (jusqu'à présent, essentiellement dans la plage de fréquences atteignant 15 MHz, voire inférieure). Il s'agit des combinaisons aB [51], bC [52], [53], cA [54] et dB [55], [56], [22]. D'autres combinaisons sont également possibles.

G.3 Concepts de forme d'onde temporelle et de plage de balayage

G.3.1 Utilisation d'une giclée de tonalité à bande étroite (concept a)

Ici, une giclée de tonalité rectangulaire et sinusoïdale de fréquence fixe, f , et de durée, τ , est appliquée. D'une manière générale, la tension de sortie de l'**hydrophone** ne montre pas de giclée rectangulaire claire, mais plutôt un signal comportant des transitoires initiaux et finaux et, dans l'idéal, une partie centrale d'amplitude constante. Il convient que la giclée soit suffisamment longue pour permettre d'obtenir une telle amplitude constante du signal de l'**hydrophone**. L'amplitude constante du signal est mesurée au moyen, par exemple, d'un oscilloscope étalonné. Le résultat obtenu se rapporte à la fréquence particulière choisie.

Ce concept se caractérise par les éléments suivants:

- il s'agit d'une méthode à fréquence unique. Si un résultat est souhaité pour plusieurs fréquences, il convient de répéter la mesure à ces fréquences. Étant donné que cela implique de changer et réaligner les transducteurs, cela peut prendre du temps;
- il convient que la plage de fréquences du transducteur source couvre la bande de fréquences souhaitée. Par conséquent, en pratique, il doit s'agir d'un transducteur amorti à large bande adapté à la plage de fréquences considérée;
- il convient que le transducteur produise des ondes ultrasonores aux amplitudes suffisamment élevées pour couvrir le bruit de l'hydrophone, en tenant compte de l'atténuation ultrasonique le long du trajet de propagation;
- si la tension de sortie de l'hydrophone est mesurée avec un appareil à large bande, il convient de vérifier la teneur en harmoniques du signal et de faire en sorte qu'elle soit inférieure à –30 dB par rapport à la fréquence fondamentale.

NOTE Si la teneur en harmoniques est supérieure à –30 dB, le filtrage passe-bande du signal à la fréquence fondamentale, ou une analyse du spectre du signal, peut être utilisé pour éliminer l'effet de la teneur de la seconde harmonique et des harmoniques supérieures, par simple analyse de la composante fondamentale.

G.3.2 Utilisation d'une forme d'onde à large bande résultant d'une giclée de tonalité à bande étroite après propagation non linéaire (concept B);

Une giclée de tonalité sinusoïdale de tension élevée est appliquée au transducteur. Le signal ultrasonore se propage sur une longue distance tant que l'**hydrophone** ne mesure pas une forme d'onde temporelle hautement dissymétrique aux positions de l'hydrophone décrites par le concept C ou E. Cette onde déformée se caractérise par des demi-périodes de compression à crête et des demi-périodes de raréfaction peu profondes. La teneur en harmoniques du spectre contient des fréquences équidistantes séparées par la valeur de fréquence fondamentale et dont les amplitudes diminuent fortement selon $1/n$, n étant le rang d'un harmonique. Le signal reçu est transmis à un analyseur de spectre ou fait l'objet d'une étape de calcul d'une transformée de Fourier rapide (TFR), le résultat de la mesure d'un nombre de fréquences discrètes étant obtenu.

La source ultrasonique elle-même peut être un transducteur résonant à bande étroite avec une fréquence inférieure à la plage considérée. Toutefois, il convient que sa fréquence ne soit pas trop faible, car il convient de générer des harmoniques aux amplitudes suffisamment élevées dont les fréquences ne sont pas trop éloignées de la fréquence fondamentale. Dans le cas de la plage de fréquences de la présente norme, et au regard des exigences de détermination de la sensibilité dépendante de la fréquence indiquée dans la CEI 62127-3, il convient que la fréquence fondamentale de ce type de transducteur se trouve dans la plage d'environ 1 MHz. Il convient que le transducteur soit en mesure de générer des amplitudes de pression dans la plage de mégapascal, mais sans générer trop de chaleur, car cela risquerait de déstabiliser la température du réservoir de mesure (voir 6.2), ce qui pourrait également se traduire par une instabilité de la conductance de radiation du transducteur. Ces problèmes peuvent être résolus grâce à un système intermittent utilisant un facteur d'utilisation adapté.

G.3.3 Utilisation d'une impulsion à large bande (concept C)

Une courte impulsion à large bande de durée, τ , est générée par le transducteur source. Le signal de sortie de l'**hydrophone** est de nouveau transmis à un analyseur de spectre. Dans ce cas, la résolution en fréquence de l'amplitude du spectre est égale à la réciproque de l'intervalle de temps au cours de laquelle l'impulsion à large bande est mesurée, et la plage de fréquences couverte par le spectre dépend de l'impulsion générée.

Il peut s'agir d'un transducteur source amorti et résonant, la partie principale du spectre de fréquences de l'impulsion se trouvant aux environs de sa fréquence de résonance, telle que déterminée surtout par son épaisseur (il convient que cette épaisseur soit faible pour les fréquences de la présente norme). Il peut également s'agir d'un transducteur épais excité par une courte crête de tension obtenue par court-circuit d'une tension élevée. Dans ce dernier cas, le principal problème lié à l'atteinte de la plage de fréquences de la présente norme réside dans l'obtention d'une commutation rapide des tensions et courants élevés. Dans ce dernier cas, l'épaisseur du transducteur détermine le délai d'arrivée de l'impulsion mécanique émise à la surface arrière du transducteur, et gêne la mesure si ce délai est trop court.

G.3.4 Utilisation d'un balayage de fréquence à ondes entretenues avec la spectrométrie de temporisation (concept D)

Un signal à ondes entretenues est utilisé avec le balayage de fréquence linéaire dans la plage de fréquences considérée et à vitesse de balayage constante. Le signal de sortie de l'**hydrophone** traverse un filtre (suiveur) à bande étroite, qui est balayé de manière synchrone, mais comportant un certain décalage de fréquence lié à la fréquence du générateur. Ce décalage de fréquence est ajusté en fonction du temps de vol (durée de propagation) du signal ultrasonore direct entre le transducteur et l'**hydrophone**, le temps de vol étant déterminé par la distance qui sépare le transducteur de l'**hydrophone** et la vitesse du son, qui est fonction de la température de l'eau. Cette technique permet de supprimer l'influence potentielle des signaux réfléchis, c'est-à-dire, d'un point de vue strict, tous ceux dont la durée de propagation diffère sensiblement de celle du signal direct.

Dans ce cas, le principal composant de l'appareil électronique est un type particulier d'analyseur de spectre capable de réaliser toutes les opérations pertinentes mentionnées. La tension de sortie de l'**hydrophone** est obtenue sous la forme d'une fonction continue de la fréquence. Il convient d'utiliser l'appareil électronique, et l'analyseur de spectre en particulier, dans la plage de fréquences considérée.

Les exigences de fréquence et d'amplitude liées au transducteur sont identiques à celles de G.3.1.

G.3.5 Analyse de la fréquence de déclenchement périodique du balayage de fréquence à ondes entretenues (concept E)

Les caractéristiques de la technique d'analyse de la fréquence de déclenchement périodique (TGFA) sont disponibles en [39].

G.4 Concepts de position de l'hydrophone

G.4.1 Position de l'hydrophone en champ proche (concept A)

L'**hydrophone** est placé assez proche du transducteur sur l'**axe du faisceau**. La giclée ou l'impulsion de l'onde plane directe est prélevée du signal de sortie de l'**hydrophone** en ajustant un temps de commutation.

Il convient de vérifier l'aptitude du transducteur en observant le signal de sortie de l'**hydrophone** lorsque l'**hydrophone** est déplacé latéralement. Idéalement, le signal de sortie de l'**hydrophone** ne dépend pas de la position latérale (dans la région paraxiale utilisable, voir G.5.2) si toutes les parties de la surface du transducteur vibrent selon une amplitude et une phase uniformes. Les questions liées aux étalonnages réalisés à proximité de la face d'un transducteur sont abordées à l'Article G.5.

La zone géométrique utilisable pour ce type de mesure peut être évaluée comme suit si τ est la durée de giclée ou la **durée d'impulsion**.

G.4.2 Position de l'hydrophone en champ éloigné (concept B)

NOTE Cela concerne uniquement les concepts de forme d'onde temporelle a, c, d et e. Pour le type de position de l'hydrophone lié au concept de forme d'onde temporelle b, voir G.4.3.

L'**hydrophone** est placé sur l'**axe du faisceau** dans le **champ lointain** du transducteur. Le **champ lointain** commence à l'emplacement du dernier maximum axial, qu'il convient de déterminer pour la fréquence la plus élevée considérée. Dans ce cas, cette distance doit être considérée comme la distance minimale pour la position de l'**hydrophone**.

Dans le cas d'une source circulaire à piston théorique plane, le dernier maximum axial se trouve à une distance $z = a_t^2 f / c$. Cette distance est proportionnelle à la fréquence, et il peut donc en résulter des valeurs de distance appréciables dans la plage de fréquences de la présente norme, selon le rayon du transducteur. Toutefois, d'une manière générale, il convient que le trajet de propagation ne dépasse pas quelques décimètres afin d'éviter, dans la mesure du possible, les conséquences de l'atténuation ultrasonique. Il convient donc de choisir des transducteurs source de diamètre suffisamment réduit dans ce cas.

G.4.3 Position de l'hydrophone en champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept C)

Concernant le concept de forme d'onde temporelle b, donné en G.3.2, il convient que le trajet de propagation soit suffisamment long pour obtenir une déformation non linéaire significative de la forme d'onde, et s'assurer que la répartition de la pression acoustique est suffisamment large pour maintenir les effets de la moyenne spatiale à un niveau inférieur à celui spécifié (voir Annexe J). Pour ce faire, il est possible d'utiliser des transducteurs à piston plan de diamètre relativement large dont la distance du champ proche ($a_t^2 f / c$) peut se trouver entre 200 mm et 400 mm [52]. Le degré de déformation non linéaire à l'emplacement de l'**hydrophone** peut être utilement caractérisé par le paramètre de déformation non linéaire, σ , dont la valeur dépend de l'amplitude de pression à la source (p_0), et pour les ondes planes est donnée par

$$\sigma = 2\pi \frac{\beta p_0 f_t z}{\rho c^3} \quad (\text{G.1})$$

où

$\beta = 1 + B/(2A)$ est le paramètre de non-linéarité pour l'eau (environ 3,5, les valeurs du paramètre de Fox-Wallace B/A étant données dans [57], par exemple);

f_t est la fréquence de commande fondamentale d'un signal utilisée pour générer la déformation non linéaire;

z est la distance de propagation, entre un hydrophone et un transducteur ultrasonique;

ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau).

Pour obtenir des conditions de comparaison optimales, il convient d'attribuer la valeur 3 à σ , ce qui correspond à une perte non linéaire de 6 dB dans l'amplitude de la fondamentale [58]. Pour cette valeur de σ , la forme d'onde apparaît en dents de scie classiques, dont les amplitudes d'harmonique spectrale varient de $1/n$, où n est le rang d'un l'harmonique. A l'aide de ces propriétés, il est utile d'évaluer l'amplitude de pression générée à des fréquences élevées, étant donné qu'elle aura un impact sur la précision d'un étalonnage. En supposant que la condition $\sigma = 3$ est vérifiée (c'est-à-dire que l'amplitude de pression au niveau du champ représente 50 % de l'amplitude de pression à la source, p_0), l'amplitude de pression générée à la limite de fréquence supérieure de la bande de fréquences de l'**hydrophone** (f_u) peut être aisément déduite par $0,5 p_0 f_t / f_u$ (principalement, le rapport f_t / f_u est équivalent à $1/n$, où n est le rang d'un harmonique correspondant à la limite de fréquences supérieure de l'hydrophone).

NOTE Pour l'eau à 22 °C, l'équation (G.1) donne $\sigma = 6,7 p_0 f_f z$, où

p_0 est exprimé en Mpa;

f_f est exprimé en MHz;

z est exprimé en mètres.

Ces expressions approximatives sont indiquées à titre informatif et supposent une propagation à onde plane et sans perte. Le comportement d'auto-focalisation des sources à piston peut être pris en compte pour fournir un traitement plus précis [58]. La condition de propagation sans perte est valide, pourvu que le paramètre $\sigma/(\alpha z)$ soit $\gg 1$, où α est le coefficient d'atténuation de l'amplitude de l'onde plane du petit signal du liquide de mesure (eau), qui est proportionnel au carré de la fréquence (dont les valeurs sont données dans l'Annexe E). Ce critère est plus généralement respecté à des fréquences fondamentales moins élevées (à 1 MHz ou 2 MHz, par exemple). A des fréquences plus élevées, ($\sigma/(\alpha z) \approx 1$) l'atténuation du petit signal de la fondamentale limitera la déformation et, par conséquent, réduira la teneur en harmoniques du coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes planes du champ dans un milieu (en général, de l'eau).

Dans le cadre d'une mise en œuvre de cette méthode, il est recommandé d'étudier le contenu fréquentiel du champ non linéaire axial du transducteur, afin d'établir la/les position(s) de comparaison optimale(s) faisant l'objet des recommandations de ce paragraphe. Il convient que cette/ces position(s) optimisent le rapport signal-bruit pour des fréquences supérieures à f_u .

G.4.4 Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (excitation à basse tension ou linéaire)(concept D)

NOTE Cela concerne uniquement les concepts de forme d'onde temporelle a, c, d et e. Pour le type de position de l'hydrophone lié au concept de forme d'onde temporelle b, voir G.4.3.

L'**hydrophone** est placé sur l'**axe du faisceau**, au foyer géométrique sphérique du transducteur source à focalisation [59]. Si la longueur focale géométrique du transducteur, F , n'est pas connue, elle peut être déterminée à partir de z_{pf} , la distance du foyer de pression (qui est la position de l'intégrale de pression d'impulsion au carré maximale le long de l'axe du faisceau) depuis le transducteur à focalisation, et par la formule

$$F = \left(\frac{1}{z_{pf}} - \frac{c}{fa_t^2} \right)^{-1} \quad (G.2)$$

Pour les conditions de propagation linéaire, il convient que le paramètre de propagation non linéaire, σ_m (voir la CEI 62127-1) des transducteurs à focalisation soit inférieur à 1.

G.4.5 Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation et excitation à tension élevée afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept E)

L'**hydrophone** est placé sur l'**axe du faisceau**, au foyer géométrique sphérique du transducteur source à focalisation. Si la longueur focale géométrique du transducteur, F , n'est pas connue, elle peut être déterminée à partir de l'emplacement du foyer de pression dans des conditions d'excitation linéaire (voir G.4.4). Pour obtenir une déformation non linéaire suffisante, il convient que le paramètre de propagation non linéaire, σ_m , soit supérieur ou égal à 3.

G.5 Considérations particulières liées aux étalonnages réalisés à proximité de la face d'un transducteur

G.5.1 Exigence générale

Il convient que la distance axiale entre l'**hydrophone** et la surface du transducteur ultrasonique, z , soit de

$$z \geq \frac{c\tau}{2} \quad (\text{G.3})$$

de sorte que toutes les impulsions réfléchies de l'**hydrophone** vers la source, et qui reviennent vers l'**hydrophone**, ne touchent pas l'extrémité de l'impulsion initialement incidente sur l'**hydrophone**.

G.5.2 Influence des ondes de bord

Soit un transducteur source circulaire plan de rayon, a_t , et un point du champ, P, à une certaine distance axiale, ~~—~~ z , du transducteur et à une distance latérale a_p de l'**axe du faisceau** (voir Figure G.1). Le trajet de l'onde plane directe est z . Le trajet de propagation le plus court de l'onde de bord est $\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2}$, appelé r dans la Figure G.1. L'exigence fondamentale est qu'il convient que τ ne soit pas supérieur à la différence de temps de vol entre l'onde de bord et l'onde plane. Cela peut se traduire par l'inégalité

$$\tau \leq \tau_{\max E} = \frac{\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2} - z}{c} \quad (\text{G.4})$$

qui peut être modifiée en

$$a_p \leq a_{p\max E} = a_t - \sqrt{(c\tau)^2 + 2c\tau z} \quad (\text{G.5})$$

qui est l'inégalité définissant la région paraxiale qui peut être utilisée.

NOTE En fonction de l'ensemble réel de valeurs de paramètre, il peut s'avérer que l'inégalité présentée dans l'équation (G.5) n'offre aucune solution (ce qui signifie, officiellement, que sa solution est négative), auquel cas ce type de mesure est impossible. Une solution palliative consisterait à réduire la durée de giclée ou la **durée d'impulsion**, τ , et/ou la distance de l'**hydrophone**, z . La condition d'inégalité présentée dans l'équation (G.5) offrant une solution positive, ce qui signifie que ce type de mesure est possible, peut être formulée de la manière suivante:

$$z < z_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{a_t}{c\tau} \right)^2 - 1 \right\} c\tau \quad (\text{G.6})$$

G.5.3 Influence potentielle des ondes réfractées

Le champ d'ondes planes proche du transducteur peut également être distribué par des ondes d'un autre type. Il s'agit d'ondes réfractées provoquées par des modes radiaux susceptibles d'exister dans le transducteur lors de l'excitation à impulsion. Si une onde radiale du transducteur part de la lunette du transducteur et se déplace à l'intérieur à une vitesse, v_t , qui est supposée supérieure à celle du son, c , dans le fluide de propagation sonore, un champ d'ondes réfractées est émis dans le fluide et peut atteindre l'**hydrophone**, puis générer un signal de sortie parasite, selon la position de l'**hydrophone** (voir, par exemple, [60] et [61]). Les caractéristiques dépendent largement de v_t . Étant donné qu'il n'existe en principe aucun a

priori quant à cette grandeur, aucune recommandation générale ne peut être donnée ici. Il convient d'étudier les caractéristiques pratiques de manière individuelle et expérimentale (voir [60]). Le traitement ci-dessous propose des formules d'évaluation analogues aux équations (G.4) et (G.5), qui sont utiles si v_t est connu.

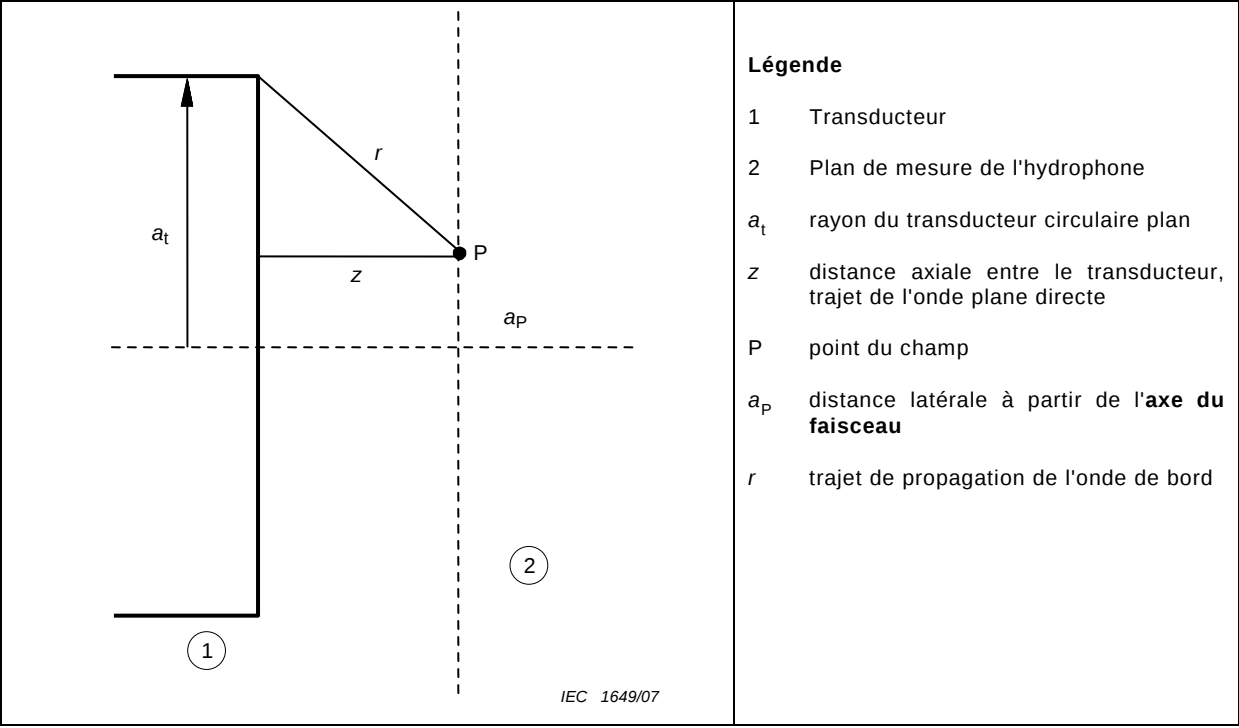


Figure G.1 – Coordonnées d'un point du champ, P, dans le champ proche d'un transducteur source circulaire plan de rayon a_t

G.5.4 Traitement des ondes réfractées proches du transducteur

Soit un transducteur source circulaire plan de rayon, a_t , conformément à la Figure G.1. Soit la région conique (symétrique à l'axe du faisceau) dont la base est la surface du transducteur circulaire et dont le sommet est le point axial

$$z = z_2 = a_t \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}, \tag{G.7}$$

où

v_t est la vitesse d'une onde radiale dans une plaque du transducteur.

La génératrice de ce cône circulaire droit est:

$$a_p = a_t - \frac{z}{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}. \quad (G.8)$$

Pour les points (z, a_p) de cette région, deux ondes réfractées seront présentes, l'une et l'autre partant respectivement du point le plus proche et le plus éloigné du périmètre de la source [60], [61]. Ces ondes réfractées coïncident sur l'axe. A tous les points de cette région conique, l'onde réfractée la plus proche arrive avant l'onde de bord. Par conséquent, il convient de tenir compte de son influence sur la région géométrique utilisable. A l'inverse des ondes de bord, les ondes réfractées sont absentes en tous les points du champ. A l'extérieur de la région conique, les ondes réfractées n'existent pas ou arrivent après l'onde de bord et, par conséquent, ne doivent pas être prises en compte dans le cadre de la présente norme.

A l'intérieur de la région conique définie ci-dessus, l'exigence fondamentale relative aux ondes réfractées est identique à celle des ondes de bord, c'est-à-dire qu'il convient que la durée de giclée ou d'impulsion, τ , ne soit pas supérieure à la différence de temps de vol entre l'onde réfractée la plus proche et les composantes d'onde plane. L'instant d'arrivée de l'onde réfractée la plus proche, t_H , est:

$$t_H = \frac{a_t - a_p + z \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{v_t} \quad (G.9)$$

Par conséquent, par analogie avec les équations (G.4) et (G.5), la condition est:

$$\tau \leq \tau_{\max H} = \frac{a_t - a_p - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\}}{v_t} \quad (G.10)$$

d'où

$$a_p \leq a_{p\max H} = a_t - v_t \tau - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\} \quad (G.11)$$

L'inégalité illustrée dans l'équation (G.11) donne des solutions positives si

$$z < z_3 = \frac{a_t - v_t \tau}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} \quad (G.12)$$

G.5.5 Indications sur la région d'onde plane paraxiale dans le cas d'une position de l'hydrophone en champ proche, en tenant compte des contributions de l'onde de bord et de l'onde réfractée

Soit un **hydrophone** placé à une distance axiale, z , d'un transducteur source circulaire plan de rayon, a_t , (conformément à la Figure G.1) émettant une durée de giclée ou d'impulsion, τ . Le critère de temps de vol conduit aux indications suivantes, en fonction de la valeur réelle de z liée à quatre valeurs de référence, dont les trois premières se présentent sous la forme z_1 , z_2 et z_3 dans les équations (G.6), (G.7) et (G.12), et dont la quatrième est définie par

$$z_4 = \frac{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} c \tau \quad (\text{G.13})$$

Différents cas sont présentés ci-dessous.

- Si $z \geq z_1$, le type de mesure considéré n'est pas possible en raison de la condition de temps de vol de l'onde de bord.
- Si $z < z_1$ et $z \geq z_2$, la mesure est possible et la région paraxiale utilisable est donnée par l'inégalité présentée dans l'équation (G.5).
- Si $z < z_1$, $z < z_2$ et $z \geq z_3$, le type de mesure n'est pas possible en raison d'une violation de la condition de temps de vol de l'onde de bord.
- Si $z < z_1$, $z < z_2$, $z < z_3$ et $z \geq z_4$, la mesure est possible et la région paraxiale utilisable est donnée par l'inégalité présentée dans l'équation (G.5).
- Si $z < z_1$, $z < z_2$, $z < z_3$ et $z < z_4$, la mesure est possible et la région paraxiale utilisable est donnée par l'inégalité présentée dans l'équation (G.11).

Il convient de noter qu'il est préférable que l'ensemble de la zone sensible de l'**hydrophone** se trouve dans la région paraxiale utilisable, de sorte que R inclue le rayon de l'**hydrophone** et, éventuellement, la distance latérale entre le centre de l'**hydrophone** et l'**axe du faisceau**.

Il convient également de noter que toutes les indications ci-dessus font l'objet de l'exigence générale d'inégalité présentée dans l'équation (G.3).

Annexe H (informative)

Spectrométrie de temporisation – Exigences et brève présentation de la technique

H.1 Généralités

A l'origine, la spectrométrie de temporisation (TDS) a été proposée [62] pour analyser le comportement des haut-parleurs en environnement de réflexion acoustique. Plus tard, elle a été proposée pour étalonner les **hydrophones** dans la plage de fréquences des mégahertz [55]. Une analyse exhaustive de la technique TDS [63] présente et examine en détail toutes les exigences liées à l'espace et l'appareillage nécessaires à sa mise en œuvre pratique. Une combinaison de la spectrométrie de temporisation et de la réciprocité [56] a été utilisée pour procéder à l'étalonnage absolu des **hydrophones**, et un certain nombre de données sont présentées dans [64]. Le facteur de mérite en termes de résolution en fréquence a également été pris en compte [22].

La présente annexe présente brièvement les exigences les plus importantes liées à la technique TDS et à ses paramètres pertinents.

H.2 Evaluation de l'étalonnage et des performances des hydrophones à ultrasons à l'aide de la spectrométrie de temporisation

H.2.1 Paramètre du champ ultrasonique mesuré

Le principal paramètre à mesurer lors de l'utilisation de la technique TDS est la pression acoustique. L'amplitude de la pression est enregistrée en même temps que la tension électrique générée au niveau des bornes de l'hydrophone. Le rapport de la tension et de sa pression correspondante donne la sensibilité en bout de câble sous la forme d'une fonction continue de la fréquence.

H.2.2 Plage de fréquences ultrasonores dans laquelle la technique est applicable

La technique est utilisée dans la gamme acoustique audible d'environ 20 Hz et dans les applications biomédicales des ultrasons comprises entre 1 MHz et 40 MHz. La technique a également été mise en œuvre avec succès dans la gamme comprise entre 100 kHz et 1 MHz.

Les limitations sont les suivantes:

- a) la plage de fréquences de l'appareil de mesure disponible;
- b) en cas d'étalonnage de substitution, la disponibilité des **hydrophones** de référence étalonnés dans la plage de fréquences considérée.

NOTE Une modification de la spectrométrie de temporisation permet d'étendre la largeur de bande d'étalonnage à au moins 60 MHz [39].

H.2.3 Configuration du champ ultrasonique pour lequel la technique est applicable

Ondes planes (onde entretenue et balayée).

H.2.4 Résolution spatiale

Le signal de sortie représente le spectre de fréquences du signal temporel mesuré. La limite de résolution en portée dépend du rapport entre la largeur de bande du filtre et la vitesse de balayage utilisée. D'une manière générale, l'**incertitude** de la résolution en fréquence de la mesure réalisée peut être exprimée sous la forme

$$f = 1/t_{\text{TDS}} \quad (\text{H.1})$$

où

f est la fréquence en hertz; et

t_{TDS} est l'instant disponible d'une mesure en champ libre en spectrométrie de temporisation (exprimé en secondes).

La réponse en fréquence et les diagrammes de directivité peuvent être aisément obtenus à l'aide de la technique TDS. Voir des exemples en [55], [56], [57], [63], [64], [65].

H.2.5 Sensibilité de la technique

La sensibilité de la technique dépend du signal d'entrée de l'**hydrophone** en essai. A des amplitudes de pression acoustique de 1 kPa, il est possible d'obtenir un rapport signal-bruit typique d'environ 50 dB. Le rapport signal-bruit maximal qu'il est possible d'obtenir est de l'ordre de 75 dB. D'une manière générale, les modifications d'environ 0,2 dB de la **sensibilité en bout de câble** peuvent être détectées.

H.2.6 Gamme dans laquelle la sensibilité est mesurée

La **sensibilité en bout de câble** ou la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** d'environ –300 dB re 1 V/μPa, (1×10^{-9} V Pa⁻¹), peut être aisément mesurée.

H.2.7 Reproductibilité

La reproductibilité habituelle se trouve dans la gamme $< \pm 5 \%$ (dans la plage comprise entre 0,1 MHz et 10 MHz) pour des sensibilités $> 3 \text{ nV/Pa}$. La reproductibilité qu'il est possible d'obtenir est d'environ 2 %.

H.2.8 Réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle peut être obtenue par une transformée de Fourier de la réponse en fréquence si la phase du signal TDS est enregistrée. La résolution de la réponse impulsionnelle est proportionnelle à la plage de fréquences enregistrée [66].

H.2.9 Mode opératoire de réalisation des mesures

Consulter [22], [55], [56], [63], [64], [66] pour connaître l'organisation habituelle des mesures. Les modes opératoires sont brièvement présentés aux Articles H.3 et H.4.

H.3 Mode opératoire de mesure (intercomparaison de sensibilité)

- Placer et aligner le transducteur (émetteur) et le récepteur (**hydrophone** préalablement étalonné [15], [66], [67]) dans un bain d'eau dégazée et distillée, contrôlé à $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Mesurer le spectre logarithmique dans la plage de fréquences sélectionnée.
- Placer le spectre mesuré (réponse en fréquence) en mémoire.
- Remplacer l'**hydrophone** à ultrasons (de référence) connu par un **hydrophone** à étalonner.
- Répéter les étapes a), b) et c).

NOTE 1 Le placement peut être réalisé comme suit: vérifier que l'**hydrophone** à étalonner se trouve dans la même position de champ que l'**hydrophone** de référence en a) envoyant une impulsion au transducteur (émetteur) et en ajustant la distance axiale de sorte que le délai de propagation de l'impulsion soit identique pour les deux **hydrophones**, puis en déplaçant l'**hydrophone** à étalonner latéralement afin d'optimiser le signal, ou b) avec la temporisation TDS, faire de même pour l'**hydrophone** de référence, en plaçant l'**hydrophone** à étalonner de manière à optimiser son signal.

- f) Noter la différence des deux spectres logarithmiques (si la réponse en fréquence de l'**hydrophone** de référence est plate, la différence représente la réponse en fréquence de l'**hydrophone** en cours d'étalonnage). Voir [22], [55], [56], [62], [63], [64] pour plus de détails.

NOTE 2 La technique TDS peut être utilisée à la fois dans le cadre d'intercomparaisons de sensibilité et d'un étalonnage (réciproque) absolu. Voir [22], [56] pour plus de détails. Toutefois, dans le cas de l'intercomparaison de sensibilité, un **hydrophone** de référence dont la réponse en fréquence est connue sous la forme d'une fonction continue de la fréquence est requis.

H.4 Mode opératoire de mesure (étalonnage réciproque)

Un étalonnage réciproque nécessite une configuration de mesure assez complexe et un appareil particulier. Plus spécifiquement, un circuit en pont à large bande, pour découpler les signaux d'émission et de réception, et une charge fictive de transducteur à large bande sont nécessaires. Deux émetteurs identiques peuvent être utilisés à la place de la charge fictive. Voir [22], [56] pour plus de détails. L'**incertitude** de mesure du mode opératoire de mesure de l'étalonnage et de la technique TDS combinés a été reportée comme étant inférieure à 10 % dans la plage de fréquences comprise entre 2 MHz et 15 MHz. Sous 2 MHz et au-dessus de 15 MHz, l'**incertitude** augmente à environ 20 %, principalement en raison du rapport signal-bruit disponible.

H.5 Limitations

L'une des limitations de la technique TDS est l'hypothèse selon laquelle le milieu de propagation n'est pas dispersif. En pratique, cela ne pose aucune difficulté, puisque l'**hydrophone** est étalonné dans de l'eau dégazée et déminéralisée.

Annexe I (informative)

Détermination de la réponse en phase des hydrophones

I.1 Présentation

La caractéristique de transfert non idéale de l'**hydrophone** utilisé gêne souvent la mesure des ondes déformées à haute fréquence ou non linéaires. Des résultats corrects peuvent être obtenus par déconvolution des formes d'onde mesurées à l'aide de la fonction de transfert à valeur complexe de la ligne de détection dans le domaine fréquentiel (voir la CEI 62127-1). Ce mode opératoire implique de déterminer la réponse en phase des **hydrophones**, en plus de l'amplitude de la sensibilité lors de l'étalonnage en cours de mesure [76], [77], [78]. La présente annexe décrit l'état courant des techniques disponibles permettant de déterminer la réponse en phase des **hydrophones**.

D'une manière générale, la sensibilité en bout de câble et la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble sont des grandeurs à valeur complexe, qui peuvent être exprimées en amplitude et en phase. L'amplitude a été obtenue par différentes techniques d'étalonnage connues depuis de nombreuses années (voir l'Article 5, par exemple). La détermination de la phase fait appel à deux propriétés de mesure particulières: la première, qui est un processus cohérent de détection, permet d'obtenir une amplitude et une phase lors de la mesure. La seconde, qui est une norme de phase comportant une réponse en phase plate ou au moins reconnue, est nécessaire pour l'étalonnage de phase absolu réalisé par étalonnage primaire ou dont la réponse en phase est connue *a priori*.

NOTE L'étalonnage de phase "absolu" se heurte à de nombreuses difficultés pratiques et techniques et n'est pas indispensable dans la plupart des cas d'application. "Absolu" s'entend ici dans le sens de "se rapportant à une source normalisée avec réponse en phase plate".

Pour déterminer la réponse en phase des **hydrophones**, les techniques appliquées avec succès à l'étalonnage de l'amplitude peuvent être étendues à la détection cohérente. Toutefois, des difficultés supplémentaires résultent de la sensibilité de la phase aux conditions d'environnement et aux conditions rigoureuses liées à l'ajustement de la distance entre l'**hydrophone** et le transducteur. A une fréquence de 20 MHz, toute modification de la température de l'eau de 10 mK se traduit par un changement de phase de 10° sur une longueur de 100 mm. Étant donné que l'eau peut difficilement être maintenue à température constante dans cette gamme pendant une longue période, des techniques de mesure sont nécessaires pour obtenir toutes les données en quelques secondes. Les systèmes d'acquisition instantanée, par exemple, utilisés en réciprocité ou en interférométrie, ne sont pas adaptés en raison du cycle de mesure trop long. En outre, tout décalage de 2 µm le long de la direction de propagation du son se traduit par un nouveau changement de phase de 10° à 20 MHz, ce qui démontre la difficulté d'un ajustement précis.

Dans les sections ci-dessous, trois techniques sont présentées. Elles ont été appliquées avec succès à l'étalonnage de phase dans différents laboratoires. En premier lieu, le principe de fonctionnement et un exemple de résultat sont présentés. En second lieu, les incertitudes et limitations sont commentées.

I.2 Spectrométrie de temporisation cohérente

I.2.1 Principe de fonctionnement

La spectrométrie de temporisation exploite la durée de propagation finie des ultrasons dans un milieu afin de garantir des conditions de champ libre lors de l'étalonnage [56], [62], [63], [68]. L'onde de pression émise par le transducteur met un certain temps pour atteindre l'hydrophone, et la fréquence instantanée du signal reçu est modifiée par

$$\Delta = \frac{f_{\text{Stop}} - f_{\text{Start}}}{t_S} \frac{l}{c} \quad (\text{I.1})$$

où

t_S est le temps de balayage;

l est la distance entre l'hydrophone et le transducteur; et

c est la vitesse du son dans un milieu (en principe de l'eau)

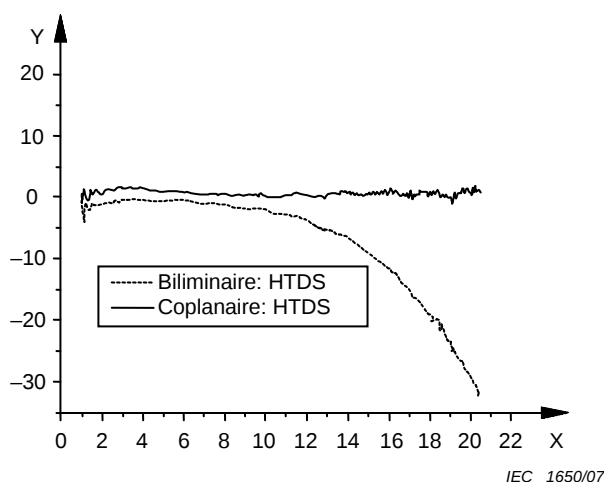
par rapport à la fréquence de la tension d'émission appliquée au transducteur lors d'un balayage entre f_{Start} et f_{Stop} . Si l'analyseur utilisé à la fois pour générer la tension d'émission et détecter le signal de l'hydrophone peut produire un décalage de fréquence entre les deux signaux, un filtre de fréquence intermédiaire étroit sélectionne la longueur du signal du son. Si le décalage de fréquence est défini sur Δ , le trajet direct entre l'émetteur et l'**hydrophone** est choisi et la réverbération produite par les parois du réservoir est filtrée.

Grâce à la technique de détection cohérente, un analyseur de réseau a été exploité pour générer et détecter les signaux. Pour garantir une relation de phase fixe entre les signaux d'émission et de réception, un système hétérodyne comportant un mélangeur distinct fermant la boucle de verrouillage de phase nécessaire (spectrométrie de temporisation hétérodyne (HTDS) [69]) est utilisé. L'analyseur de réseau fonctionne en mode de décalage de fréquence et la fréquence de l'oscillateur local est définie sur $f_{LO} = 50$ MHz. Un second mélangeur fournit le signal d'émission envoyé au transducteur. Deux mesures sont réalisées dans des conditions d'excitation identiques, l'une avec l'**hydrophone** de référence et l'autre avec l'**hydrophone** à étalonner. La réponse en fréquence de l'**hydrophone** est obtenue par comparaison des résultats.

Une autre technique permettant de séparer les signaux parasites des informations de mesure fonctionne dans le domaine temporel et non dans le domaine fréquentiel, et utilise les différentes durées de propagation des signaux [39], [69]. Dans un premier temps, la réponse en fréquence de la ligne de transmission transducteur-**hydrophone** est déterminée, et le transducteur est excité par une tension de balayage continue augmentant de f_{Start} à f_{Stop} . Ensuite, la tension du signal dépendante de la fréquence obtenue est convertie vers le domaine temporel par un algorithme FFT inverse. Le son direct, les signaux de réverbération et d'autres perturbations sont représentés sous forme de signaux sur l'échelle de temps apparaissant à leurs durées de propagation respectives. Dès lors, un déclencheur est placé à la position temporelle $t' = c/l$, et toutes les contributions de signal parasite sont éliminées.

I.2.2 Résultats de l'exemple

Les techniques de spectrométrie de temporisation cohérente peuvent être appliquées à tous les **hydrophones** habituels. La Figure I.1 illustre les résultats de mesure pour deux hydrophones à membrane de diamètre actif de 1 mm et d'épaisseur de couche de 25 μm . Une augmentation de l'amplitude de la sensibilité est liée à un changement de phase provoqué par la résonance d'épaisseur de la membrane à 40 MHz et 22 MHz, respectivement.



Légende

X f (MHz)

Y $\arg(M)$ (°)

Figure I.1 – Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de deux hydrophones à membrane

Les résultats sont liés à l'utilisation de la spectrométrie de temporisation hétérodyne (HTDS). La ligne en pointillés représente un hydrophone biliminaire et la ligne continue un hydrophone à une seule couche.

I.2.3 Incertitudes

Les **incertitudes** dépendent de nombreux paramètres de mesure. Toutefois, la contribution la plus importante résulte de la détermination de la distance entre le transducteur et l'**hydrophone**. Elle est principalement influencée par les incertitudes d'ajustement et les fluctuations de température lors de la mesure. Le Tableau I.1 donne des valeurs représentatives pour l'étalonnage d'un **hydrophone** de type à aiguille.

Tableau I.1 – Exemple d'incertitudes (où un facteur de couverture $k = 2$ est utilisé) dans le cas de l'étalonnage de phase HTDS d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre, exprimé à un niveau de confiance de 95 %

Plage de fréquences MHz	Incertitude Degrés (°)
2 - 5	15,9
5 - 12	8,8
12 - 20	13,0
20 - 30	19,1
30 - 40	25,0

NOTE L'épaisseur de membrane globale de l'hydrophone biliminaire est de 50 μm .
L'hydrophone à une seule couche comporte une seule couche de polyfluorure de vivylidène de 25 μm d'épaisseur.

NOTE L'importance des incertitudes de phase absolue n'a pas été clairement établie à ce jour. Dans le cas des modes opératoires de déconvolution, les décalages de phase dépendant de la fréquence constante et linéaire ne sont pas pertinents, et l'écart de "seconde ordre" est la valeur à retenir.

I.2.4 Limitations

Les techniques reposant sur la spectrométrie de temporisation peuvent être appliquées à tous les **hydrophones** habituels. Grâce à des sources acoustiques adaptées, un rapport signal-bruit suffisant est obtenu. Étant donné qu'il s'agit d'une méthode d'étalonnage secondaire, une norme de phase est nécessaire pour l'amplitude absolue et l'étalonnage de phase.

I.3 Etalonnage des amplitudes avec un hydrophone multicouche optique

I.3.1 Principe de fonctionnement

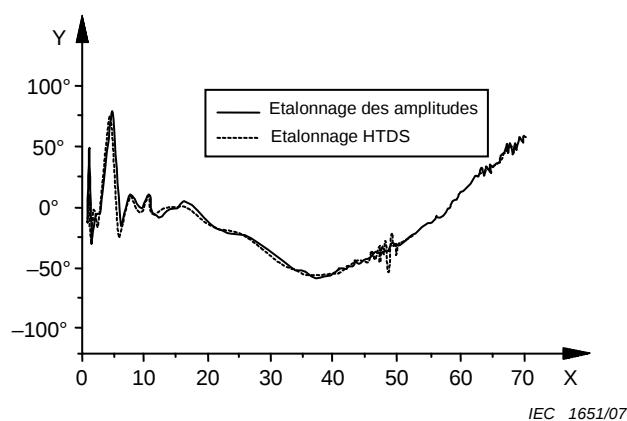
Les techniques reposant sur la spectrométrie de temporisation offrent des valeurs de sensibilité uniquement par rapport à une référence. Pour obtenir des valeurs absolues, une norme de phase est nécessaire, c'est-à-dire principalement étalonné ou dont la phase est connue *a priori*. Un **hydrophone** multicouche optique offre une excellente réponse en fréquence d'amplitude plate [70], qui est censée être accompagnée d'une réponse en phase tout aussi plate, et l'**hydrophone** multicouche optique peut être utilisé comme la norme de phase requise.

L'**hydrophone** multicouche optique est composé d'un substrat en verre couvert de revêtements optiques diélectriques [70], [71], [72]. Ces revêtements forment un micro-interféromètre, dont le pouvoir de réflexion est très sensible aux changements de l'épaisseur et de l'indice de réfraction des couches. Si l'onde sonore frappe l'hydrophone, la pression acoustique déforme les couches et la modification du pouvoir de réflexion est mesurée par un simple système de détection composé d'un laser He-Ne, de deux lentilles et d'un photodétecteur. Le substrat est éclairé obliquement pour correspondre à la résonance optique, c'est-à-dire à la longueur d'onde de fonctionnement du capteur par rapport à la longueur d'onde du laser. En raison de l'épaisseur finie du substrat en verre, l'intervalle de temps pour les mesures non déformées par les réflexions acoustiques provenant de l'arrière est limité, et il convient d'utiliser de courtes impulsions pour l'excitation acoustique.

L'**hydrophone** multicouche optique est excité par de courtes impulsions d'onde sonore déformées non linéaires générées par un transducteur à focalisation commandé par un générateur d'impulsions électriques rapides. La tension de sortie du photodétecteur est proportionnelle à la pression acoustique, et le signal peut être obtenu par un oscilloscope à échantillonnage, puis stocké sur un ordinateur. Un mode opératoire FFT dans l'ordinateur fournit le spectre de fréquences du signal. La mesure est répétée dans différentes conditions correspondantes entre le transducteur et le générateur, en décalant légèrement les fréquences de la fondamentale et de l'harmonique des impulsions afin de couvrir la totalité de la plage de fréquences de la mesure avec une intensité de signal élevée. Noter que la fondamentale et les harmoniques ne sont pas des lignes à bande étroite, mais des fréquences à large bande représentant de nombreuses composantes du spectre. La réponse en fréquence est obtenue par deux mesures, la première utilisant l'**hydrophone** optique comme hydrophone de référence, et la seconde utilisant l'**hydrophone** à étalonner.

I.3.2 Exemple de résultats

Par exemple, la phase d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre a été déterminée par la technique des impulsions avec l'**hydrophone** multicouche optique. Pour la comparaison, la mesure HTDS utilisant la même référence est également décrite.



Légende

X f (MHz)

Y $\arg(M)$ (°)

**Figure I.2 – Phase de la sensibilité en circuit ouvert
en bout de câble d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre**

La ligne en pointillés représente les résultats liés à l'utilisation de la spectrométrie de temporisation hétérodyne (HTDS). La ligne continue représente les résultats liés à l'étalonnage des amplitudes.

I.3.3 Incertitudes

Le mode opératoire FFT gêne l'évaluation des incertitudes, la plupart des effets étant masqués par le mode opératoire numérique. Toutefois, comme dans le cas des techniques TDS, la principale contribution à l'évaluation de l'**incertitude** résulte de la détermination de la distance entre l'**hydrophone** et le transducteur, et les valeurs ne sont pas très différentes de celles données dans le Tableau I.1. Les termes de phase linéaire (bien qu'inadaptés aux modes opératoires de déconvolution) peuvent être limités par la technique de corrélation croisée [72].

NOTE Pour connaître la signification des valeurs de l'**incertitude** de phase, voir la Note à la fin de I.2.3.

I.3.4 Limitations

En raison de l'épaisseur finie du substrat en verre, il convient d'utiliser de courtes impulsions pour l'excitation acoustique de l'**hydrophone** multicouche optique. Cela permet de limiter la gamme d'application du côté des basses fréquences à 500 kHz. Afin d'obtenir des fréquences suffisamment élevées pour les modes opératoires de déconvolution, des impulsions non linéaires fortement focalisées sont nécessaires, en limitant le diamètre actif des hydrophones à $< 0,5$ mm. En association avec la spectrométrie de temporisation hétérodyne, un service d'étalonnage peut néanmoins être établi pour couvrir la totalité du spectre des **hydrophones** piézoélectriques et optiques habituels.

I.4 Modélisation de la propagation non linéaire des impulsions

I.4.1 Principe de fonctionnement

Les techniques présentées dans en I.2 et I.3 s'appuient sur la comparaison d'un dispositif normalisé (ou de référence) pour déterminer la réponse en phase. Par ailleurs, un champ acoustique connu peut être appliqué en référence, à l'appui d'une solution théorique. Toutefois, il convient de s'assurer que, dans tous les cas, le champ acoustique expérimental est conforme à la solution théorique.

Une réalisation possible consiste à utiliser la propagation non linéaire des impulsions [73]. Un seul transducteur de l'élément génère une courte impulsion acoustique focalisée sur une longue distance. Lors de la propagation non linéaire, plusieurs harmoniques sont générées avec une relation de phase définie par rapport à la fondamentale, qui peut être calculée par un modèle théorique. Si les phases relatives des harmoniques sont mesurées, une comparaison au modèle donne la réponse en phase du système de mesure (non de l'**hydrophone** seul).

I.4.2 Limitations

La technique de propagation des impulsions donne la réponse en phase de la ligne de détection complète. La réponse en phase de l'hydrophone peut être déduite uniquement si les réponses de tous les autres éléments sont connues. Il convient d'utiliser un modèle de propagation du son adapté et de le valider avec soin en fonction du champ expérimental à appliquer à l'**hydrophone**.

Annexe J (informative)

Considérations liées à la taille maximale de l'élément actif d'un hydrophone

J.1 Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ proche (Annexe G – Concept A de position de l'hydrophone)

Si le concept de position de l'hydrophone en champ proche, conformément à l'Annexe G, est choisi, le rayon maximal de l'**hydrophone** est en principe uniquement limité par celui de la région paraxiale utilisable dans le sens de G.4.1. Toutefois, si la vérification du déplacement latéral recommandé montre des variations d'amplitude, il convient qu'elles soient inférieures à ± 1 dB en cas de déplacement d'un **hydrophone** sur une distance égale au **rayon efficace de l'hydrophone** dans toutes les directions latérales.

J.2 Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ lointain (Annexe G – Concept B de position de l'hydrophone)

Pour procéder à une évaluation, une simple approximation reposant sur la propagation linéaire dans le **champ lointain** d'une source à piston plane circulaire peut être donnée par

$$a_{\max} = \frac{cZ}{8fa_t} \quad (\text{J.1})$$

NOTE 1 D'un point de vue strict, cette formule s'applique uniquement si $Z \gg a_t$ et $Z \ll 20fa_t^2/c$ (voir [2]), mais cette condition est généralement remplie dans les mesures abordées dans le présent paragraphe.

NOTE 2 Dans [2], un mode opératoire de correction théorique a été déduit, pour multiplier l'amplitude de pression mesurée par $(1 + \delta_{av})$ afin d'obtenir l'amplitude de pression vraie, où δ_{av} est donné par $\delta_{av} = [\pi a / (16a_{\max})]^2$ avec $a_{\max}$, comme dans l'équation (J.1). Cela concerne uniquement l'orientation de l'**hydrophone** de référence, c'est-à-dire la surface de l'**hydrophone** perpendiculaire à l'axe du faisceau.

NOTE 3 L'équation (J.1) peut également être utilisée dans le cas du concept D de position de l'hydrophone (voir l'Annexe G).

J.3 Taille maximale de l'hydrophone dans le cas d'un champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (Annexe G – Concept C de position de l'hydrophone)

La forme d'onde temporelle en un point du champ utilisé pour l'intercomparaison est composée d'un certain nombre de fréquences d'harmonique. La répartition de la pression de chacune d'elles doit être suffisamment large pour s'assurer que la moyenne spatiale sur l'élément de l'**hydrophone** n'altère pas la précision de l'étalonnage fourni. Les conditions d'onde plane de l'ouverture de réception efficace de l'**hydrophone** peuvent être évaluées par le choix judicieux du diamètre du transducteur et de la distance de propagation.

Étant donné que les largeurs de faisceau des harmoniques plus élevées diminuent progressivement avec l'augmentation de la fréquence, la moyenne spatiale sera moins importante à la limite de fréquence supérieure de la bande de fréquences indiquée de l'hydrophone, f_u . Il est possible d'estimer l'effet de la moyenne spatiale en tenant compte de la largeur de faisceau de l'harmonique de la fréquence la plus élevée à l'aide d'un paramètre γ , donné par

$$\gamma = (-6 \text{ dB beamwidth of } f_u \text{ component}) / (\text{effective hydrophone diameter}) \quad (\text{J.2})$$

largeur de faisceau de -6 dB de la composante diamètre efficace de l'hydrophone

NOTE 1 Les largeurs de faisceau auxquelles il est fait référence dans l'expression sont des valeurs mesurées et, si $\gamma > 2$, les largeurs de faisceau mesurées et réelles (vraies) peuvent être considérées comme équivalentes. La condition de $\gamma = 2$ correspond à une correction de la moyenne spatiale de 7,5 %.

Une erreur de moyenne spatiale inférieure à 3,5 % requiert $\gamma > 3$. Une réduction de l'erreur admissible à 2 % requiert $\gamma > 4$ [74].

NOTE 2 Le rayon maximal recommandé de l'**hydrophone** est donné par $a_{\max} = cz / (8fa_t)$. Si $z = a_t^2 f / c$, cela correspond à une valeur γ d'environ 2,8.

Il est possible de déduire des lignes directrices simples permettant d'établir les conditions expérimentales requises visant à limiter l'effet de la moyenne spatiale à ce niveau recommandé. Deux hypothèses sont réalisées au cours de cette analyse:

- la largeur de faisceau de la composante de fréquence fondamentale dans des conditions non linéaires, utilisée pour l'intercomparaison, est identique à celle déduite de la propagation linéaire;

NOTE 3 La répartition de la pression change au fur et à mesure de l'augmentation des valeurs de σ , ce qui se traduit par un élargissement du profil du faisceau des harmoniques individuelles [36]. Par conséquent, l'analyse actuelle représente un scénario du cas le plus défavorable.

- les largeurs de faisceau de l'harmonique sont données par $w_f / \sqrt{n}$, où w_f est la largeur de faisceau de la composante fondamentale et n le rang d'un harmonique [75].

Si f_f est la fréquence de commande fondamentale du signal utilisée pour générer la déformation non linéaire, et si f_u est la limite de fréquence supérieure de la bande de fréquences indiquée de l'hydrophone pour l'étalonnage, alors, en supposant qu'il s'agit d'un transducteur à piston plan idéal, une expression peut être déduite pour $z_{\min}$, qui est la distance minimale requise entre le transducteur et l'**hydrophone** pour maintenir l'effet de la moyenne spatiale sous le niveau recommandé. L'expression de $z_{\min}$, valide pour des valeurs importantes de ka_t , est:

$$z_{\min} = 0,451 \gamma a_h k a_t \sqrt{\frac{f_u}{f_f}} \quad (\text{J.3})$$

où

a_h est le **rayon efficace de l'hydrophone**;

$k = 2\pi f_f / c$ est le nombre d'ondes circulaires;

a_t est le rayon efficace du transducteur ultrasonique (émetteur).

Cette équation peut être utilisée pour déduire les valeurs approximatives de $z_{\min}$, même si, en raison de l'élargissement non linéaire, de plus petites distances peuvent réellement être utilisées.

Dans le cadre d'une mise en œuvre de la méthode du concept bC (voir Annexe G), il convient d'étudier le contenu fréquentiel de la forme d'onde à différentes positions en partant de l'axe, afin de vérifier la nature de la répartition de la pression.

NOTE 4 L'équation (J.3) peut également être résolue pour a_h , donnant le rayon maximal de l'**hydrophone** à une distance donnée Z .

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 électriquementNOTE 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/Pa²)**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 bornesNOTE 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 (Ω).

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' hydrophone
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_{i1}	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 hydrophone 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' hydrophone
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 hydrophone
M	Sensibilité en champ libre d'un hydrophone
M^*	Sensibilité apparente en champ libre d'un hydrophone , 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' hydrophone
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' hydrophone
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 hydrophone
U_1	Tension en circuit ouvert pour le transducteur auxiliaire
U_{ref}	Tension de référence
v	Vitesse de la surface émettrice du transducteur
z	Distance le long de l'axe acoustique du transducteur
α	Coefficient d'atténuation d'amplitude des ondes planes dans un milieu (généralement de l'eau)
λ	Longueur d'onde ultrasonore
ρ	(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;
- ρ 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 défectueux.

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 λ 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_{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_{ref} , à condition que la valeur de U_{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 ± 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:

- a) le quotient du diamètre du transducteur auxiliaire par celui de l'**hydrophone** est supérieur à 5, et
- b) 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

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

$$\text{où: } s = (d_1 + d)\lambda / a_1^2$$

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.

α' 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_{u1} 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_{u1} 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:

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

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_{u1} 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):

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

où:

p_{tr} est la pression acoustique dans l'onde acoustique immédiatement devant le projecteur, en l'absence d'effet d'interférence, pour un courant d'entrée I

p_{rec} est la pression acoustique dans le champ libre non perturbé d'une onde plane dans la position du centre acoustique du récepteur, s'il a été retiré, qui donne une tension en circuit ouvert U .

Pour une onde plane, la pression devant le projecteur est associée à la vitesse uniforme de surface par la relation suivante:

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

où:

ρ est la densité du milieu de propagation

c est la vitesse du son dans le milieu

Il peut désormais être supposé que l'onde acoustique se propage entre la transmission et la réception sans perte ou effets de diffraction, comme par exemple dans une onde plane infinie circulant dans un milieu exempt de perte,

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

La force exercée sur la surface du récepteur, la surface A , est par conséquent donnée par:

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

Ainsi, dans les conditions aux limites d'onde plane supposées, le quotient

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

dépend uniquement de la surface du transducteur, et est identifié comme le paramètre de réciprocité d'onde plane J_p . La valeur de J_p étant connue, une mesure de U et I permet de déterminer directement p , et ainsi S et M .

NOTE Si I_1 et U_1 sont le courant d'entrée et la tension reçue pour un transducteur réel transmettant et recevant un signal à giclée de tonalité dans l'eau, réfléchi par une interface plane eau/métal, on obtient alors:

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

où:

M_1^* et S_1^* sont les valeurs apparentes de la sensibilité de tension en champ libre et de la réponse de transmission au courant du transducteur supposant des conditions de mesure d'onde plane parfaites

Ainsi, à partir des équations (K.3) et (K.19):

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

Dans tout plan de mesure pratique aux fréquences considérées dans le présent document, il n'est pas possible d'établir des conditions d'onde plane vraies, une tolérance doit donc être définie pour la différence entre p_{tr} et la valeur de p_{rec} moyennée sur la surface active du récepteur.

K.10 Informations détaillées des procédures expérimentales recommandées

K.10.1 Evaluation du rayon efficace du transducteur auxiliaire

Le rayon efficace, a_1 , du transducteur auxiliaire est déterminé à partir d'un tracé de l'amplitude de la pression acoustique en fonction de la distance le long de l'axe acoustique, lorsque le transducteur fonctionne en mode d'ondes entretenues. Ce tracé peut être réalisé par une mesure effectuée avec un **hydrophone** non étalonné dans un champ à giclée de tonalité, à condition que le diamètre de l'élément actif de l'**hydrophone** corresponde au moins à un facteur de dix inférieur à celui du transducteur auxiliaire, et que la giclée de tonalité soit suffisamment longue pour pouvoir établir des conditions stables. La répartition acoustique déterminée de manière expérimentale est comparée à celle prévue pour une source à piston parfaite, c'est-à-dire lorsque la surface émettrice se déplace dans l'espace selon une vitesse uniforme, v . Le rayon de la source théorique, a_1 , est ensuite réglé pour s'ajuster à l'accord optimal entre les données expérimentales et le modèle de champ. La répartition théorique d'une source à piston est donnée par l'expression suivante:

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

où:

p est l'amplitude de la pression acoustique à une distance z le long de l'axe acoustique du transducteur

p_{tr} est l'amplitude de la pression d'onde plane donnée par $p_{tr} = \rho c v$

λ est la longueur d'onde acoustique

a_1 est le rayon de la source, et

α' est le coefficient d'atténuation d'amplitude pour de l'eau à 23°C

Dans la pratique, les valeurs de p_{tr} et a_1 sont réglées pour s'ajuster au mieux à l'accord entre les données expérimentales et les données théoriques.

NOTE Une méthode d'obtention de cet ajustement se présente comme suit: Si $Y_i(z_i)$ est défini comme $20 \log_{10} U_i$, où U_i est l'amplitude de la tension de signal produite par l'**hydrophone** à une distance z_i du transducteur et $Y'(z_i)$ est défini comme:

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

alors, le paramètre

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

Où

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

est réduit par rapport à a_1 . Cette procédure d'ajustement n'est appliquée qu'aux données pour lesquelles Z est compris entre $1,5 Z_m$ et $3 Z_m$, où Z_m est la valeur de Z à la position de pression maximale la plus éloignée de la surface du transducteur. Ainsi, après détermination de a_1 , on vérifie l'application satisfaisante du modèle en tant que représentation du champ vrai en évaluant $X_m(z_m)$. Une amplitude de $X_m(z_m)$ inférieure à 0,5 dB est prise pour indiquer que le modèle est satisfaisant.

K.10.2 Évaluation des facteurs de réduction de tension

Les facteurs de réduction de tension a_{u1} , a_u et a_{ll} sont tous déterminés au moyen d'un seul atténuateur de précision, utilisé entre la source de tension de référence et sa charge normalisée connue R_0 . (Voir Figure K.2).

Pour a_{u1} , la chute de tension sur R_0 est également affichée avec U_1 sur un oscilloscope, et l'atténuateur est réglé par contrôle à la valeur pour laquelle les signaux sont d'amplitude égale. Ce réglage de l'atténuateur permet de réaliser une mesure directe de a_{u1} . De même, a_u est déterminé en comparant la tension sur R_0 avec U .

La valeur de a_{ll} est également déterminée par réglage de l'atténuateur, mais dans ce cas, les deux signaux à comparer et égaliser par cet ajustement sont le courant qui circule dans le transducteur et le courant dans R_0 . Ils sont contrôlés en réalisant une configuration qui permet de les faire passer de manière alternative par la même sonde de courant dont la sortie est affichée sur l'oscilloscope. Un étalonnage absolu de la sonde de courant n'est pas nécessaire.

NOTE 1 Dans le circuit simple illustré à la Figure K.2, le même générateur de giclée de tonalité est utilisé pour alimenter le transducteur et fournir U_{ref} . Si cette configuration est utilisée dans la pratique, il est approprié de placer un deuxième atténuateur entre le commutateur **SW A** et le transducteur afin de pouvoir régler le courant d'alimentation indépendamment de U_{ref} .

Les procédures expérimentales détaillées nécessaires lors de l'utilisation de la configuration du circuit illustrée à la Figure K.2 sont les suivantes:

- i) Le réflecteur étant réglé pour renvoyer la giclée de tonalité transmise au transducteur auxiliaire et les commutateurs **SW B** et **SW C** étant en position 1, a_{ll} est déterminé par réglage de l'atténuateur pour des tensions de signaux égaux contrôlées aux deux positions du commutateur **SW A**.
- ii) Le réflecteur et le commutateur **SW B** étant réglés selon i), **SW C** passe ensuite en position 2 et a_{u1} est déterminé en réglant de nouveau l'atténuateur pour des signaux égaux aux deux positions du commutateur **SW A**.

NOTE 2 Dans ce cas, le signal contrôlé en position 1 est U_1 , ceci est bien entendu retardé en fonction de la durée de la giclée de tonalité source d'une période égale au temps de transit de l'impulsion acoustique dans le réservoir d'eau. Il est donc nécessaire de disposer d'un déclencheur retardé approprié.

- iii) Le réflecteur étant réglé pour diriger le centre du champ réfléchi vers l'**hydrophone**, les procédures détaillées en i) et ii) ci-dessus sont répétées. Ceci permet de réaliser une deuxième mesure de a_{ll} et une valeur correspondante de a_u . L'utilisation de cette valeur de a_{ll} dans la racine carrée de l'équation (K.7), donnée en K.6, rend inutile de maintenir constante la tension de référence U_{ref} pendant l'ajustement du réflecteur.

Afin de s'assurer que le faisceau réfléchi est centré sur le transducteur, selon i) et ii), ou sur l'**hydrophone**, selon iii), il est important d'ajuster avec soin les positions de ces composants pour obtenir un signal détecté maximal. Il convient de réaliser l'ajustement des positions des dispositifs dans les plans perpendiculaires à la direction de la propagation des ondes acoustiques incidentes et de leurs orientations par rapport à leurs centres acoustiques. Il est important que la précision de ces ajustements corresponde au moins à la longueur d'onde acoustique et à $0,05^\circ$ respectivement.

K.11 Evaluation du facteur de correction, k

Un facteur de correction plus général que celui décrit en K.7 est obtenu par l'expression:

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

où:

- G_1 est la correction nécessaire pour tenir compte des changements de l'onde acoustique entre la transmission et la réception pendant l'étalonnage par auto-réciprocité du transducteur auxiliaire
- G_2 est la correction nécessaire pour tenir compte des changements équivalents pendant l'étalonnage de l'**hydrophone** dans le champ connu généré par le transducteur auxiliaire
- r est le coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau, et les autres paramètres sont tels que définis en K.7

La valeur de G_1 ou G_2 appropriée à tout système expérimental est égale au quotient de la pression acoustique moyennée sur la surface du récepteur (ou de l'**hydrophone**) par celle dans l'onde plane immédiatement devant l'émetteur (en l'absence d'interférence) exprimé en fonction de la longueur de trajectoire acoustique. Un tracé logarithmique de ce quotient, $|p/p_0|$, en fonction de la distance normalisée dérivée de manière théorique pour différents quotients de diamètre de récepteur/émetteur a été obtenu pour une source à piston parfaite par la référence [7] en K.12. Ces résultats sont indiqués dans la Figure K.4. (La distance normalisée est la distance de la surface du transducteur divisée par la distance du champ proche). La valeur de G_1 est associée au transducteur auxiliaire utilisé comme émetteur et récepteur, elle est obtenue à partir du tracé correspondant à une unité de quotient de diamètre. G_2 est associée à l'onde transmise par le transducteur auxiliaire et reçue par l'**hydrophone**, et le tracé correspondant au quotient de diamètre approprié doit être utilisé. Si les recommandations données dans la présente norme sont suivies, ce quotient sera alors dans tous les cas inférieur à 0,2.

La valeur de $(1/r)$ pour une interface eau/acier inoxydable est de 1,033.

D'autres termes utilisés pour le facteur de correction sont spécifiés en K.6.

NOTE 1 La Figure 4 exprime le quotient $|p/p_0|$ en décibels

NOTE 2 Pour les applications pour lesquelles l'**hydrophone** est utilisé dans un milieu différent de celui dans lequel il est étalonné, il peut se révéler nécessaire d'appliquer un terme de correction supplémentaire.

K.12 Bibliographie

- [1] BEISSNER, K. Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field. *Acustica*, 1980, 46, p.162.
- [2] BRENDEL, 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] BRENDDEL, 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] BRENDDEL, 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.

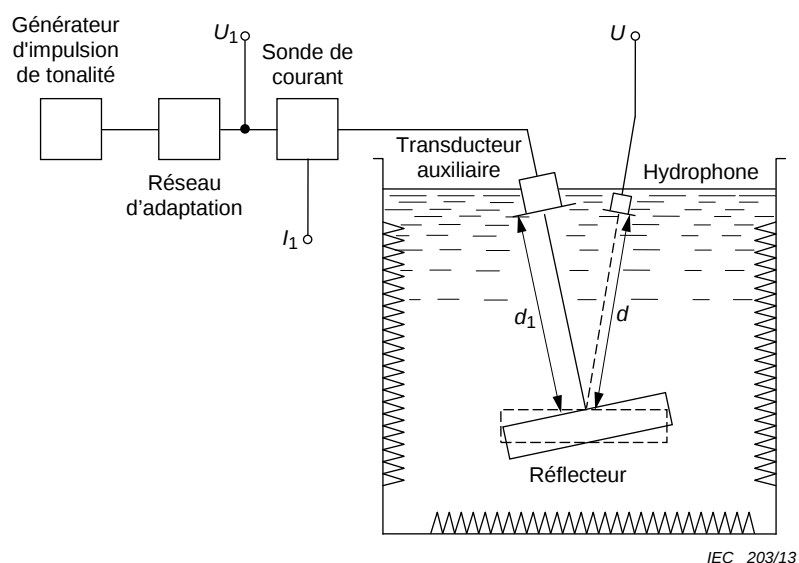


Figure K.1 – Configuration expérimentale pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs

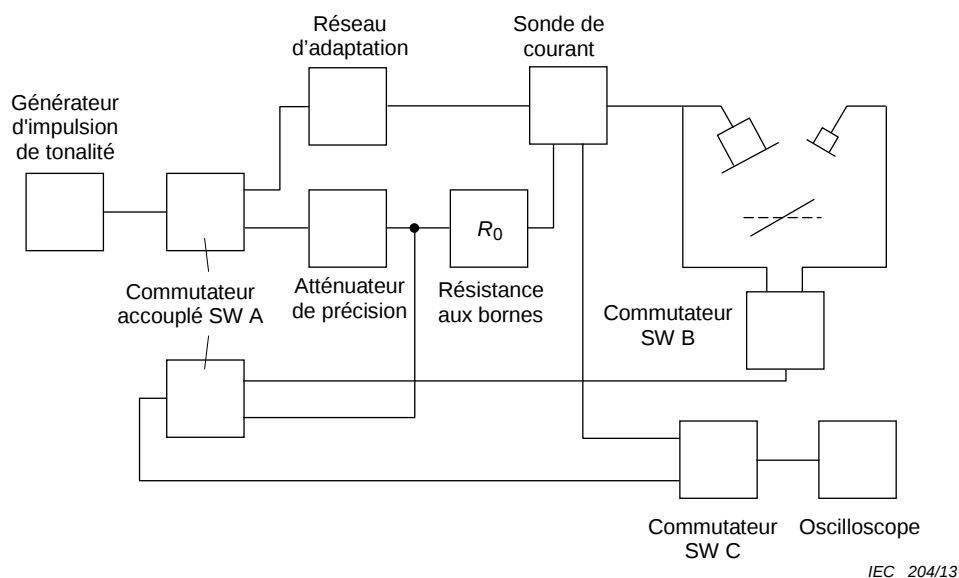


Figure K.2 – Organigramme du circuit électrique pour la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs

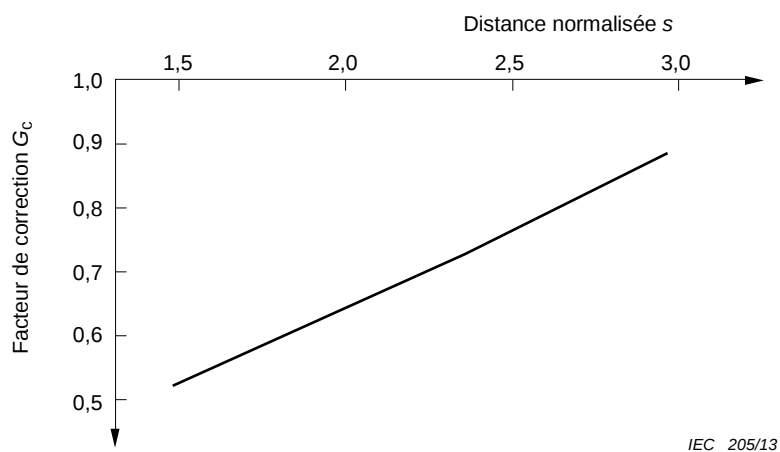


Figure K.3 – Valeur du terme G_c (partie du facteur de correction k) tracée en fonction de la distance normalisée

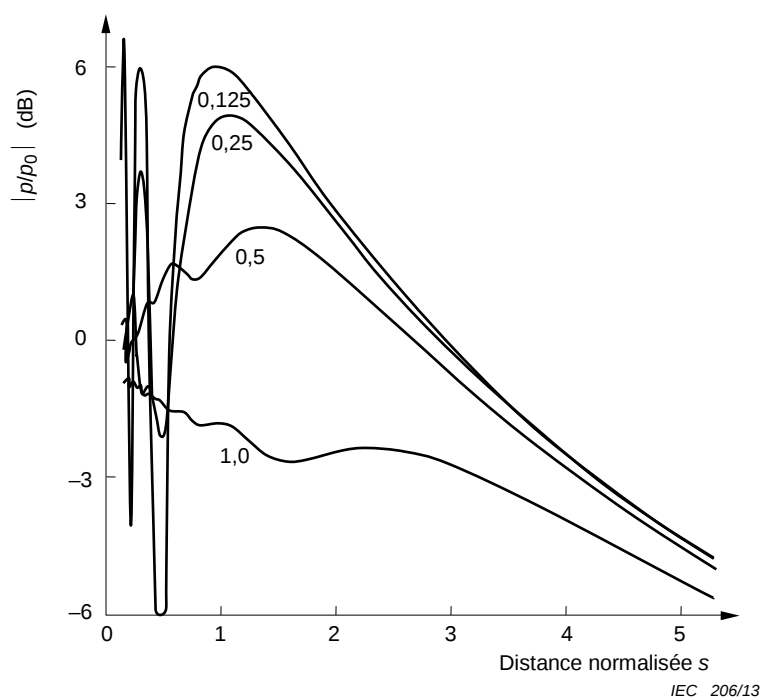


Figure K.4 – Pression moyenne tracée en fonction de la distance normalisée pour des transducteurs de dimension différente. Le paramètre correspond au quotient de diamètre de récepteur/émetteur (selon la référence [7] en K.12)

Bibliographie

- [1] HARRIS, GR. Are current hydrophone low frequency response standards acceptable for measuring mechanical/cavitation indices? *Ultrasonics*, 1996, vol. 34, iss. 6, p. 649-654.
- [2] BEISSNER, K. Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements. *Acustica*, 1985, vol. 59, p. 61-66.
- [3] ISO *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. Genève, Suisse, 1995.
- [4] FAY, B., LEWIN, PA., LUDWIG, G., SESSLER, GM. and YANG, G. The influence of spatial polarization distribution on spot poled PVDF membrane hydrophone performance. *Ultrasound Med. Biol.*, 1992, vol. 18, no. 6-7, p. 625-635.
- [5] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A. and BERGER, WA. The influence of finite aperture and frequency response of ultrasonic hydrophone probes on the determination of acoustic output. *Ultrasonics*, April 2004, vol. 42, iss. 1-9, p. 367-372.
- [6] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., NOWICKI, A., and BERGER, WA. Hydrophones' effective diameter measurements as a quasi-continuous function of frequency. *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, iss. 8, p. 635-641.
- [7] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. Probing acoustic fields of clinically relevant transducers: the effect of hydrophone probes' finite apertures and bandwidths. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, October 2004, vol. 51, iss. 10, p. 1262-1270.
- [8] HARRIS, GR., GAMMELL, PA., RADULESCU, EGR. and LEWIN, PA. Interlaboratory evaluation of hydrophone sensitivity calibration from 0.1 to 2 MHz via time delay spectrometry. *Ultrasonics*, April 2004, vol. 42 iss. 1-9, p. 349-353.
- [9] BEISSNER, K. On the plane-wave approximation of acoustic intensity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 71, p. 1406–1411.
- [10] BEISSNER, K. Radiation force and force balances. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, p. 127-142.
- [11] FICK, SE. The NIST power reference source. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 6, p. 169-183.
- [12] BEYER, RT. *Nonlinear Acoustics*. U.S. Government Printing Office, 1975.
- [13] CARSTENSEN, EL. and MUIR, TG. The role of nonlinear acoustics in biomedical ultrasound. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 3, p. 57-79.
- [14] BJORNO, L. and LEWIN, PA. Measurement of B/A parameter in tissues. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 6, p. 141-163.
- [15] LEWIN, PA. Practical implementations and technology of measurement devices. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992. Ch. 7, p. 185-215.

- [16] DUCK, FA. and MARTIN, K. Exposure values for medical devices. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 11, p. 315-344.
- [17] BACON, DR. Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, January 1982, vol. SU-29, no. 1, p. 18-25.
- [18] LEWIN, PA. Linearity of the polymer probes. *Proc. WFUMB*. Sydney. Elmsford, NY: Pergamon Press, 1985, p. 537.
- [19] KRAYNAK, T., SCHAFER, ME. and KRAKHMAN, V. Development of a cost-effective shock wave hydrophone. *1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1994, p. 1805-1808.
- [20] DODICK, JM. *Surgical instrument with input power transducer*. US Patent No. 5324282.
- [21] LEWIN, PA., BHATIA, R., ZHANG, Q., and DODICK, J. Characterization of optoacoustic surgical devices. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1995.
- [22] SCHAFER, ME. Techniques of hydrophone calibration. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 8, p. 217-255.
- [23] TRIER, HG. Ultrasonic devices for surgery (cataract removal and vitrectomy) in ophthalmology. *J. d'Echographie Med. Ultrasonore*, 1985, vol. 1, p. 17-23.
- [24] BEISSNER, K. Schallfelduntersuchungen an ophthalmologisch-chirurgischen Ultraschallgeraeten. In *Fortschritte d. Akustik – DAGA '80*. Berlin: VDE-Verlag, 1980, p. 567-570.
- [25] SCHAFER, ME. and BROADWIN, A. Acoustical characterization of ultrasonic surgical devices. *1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1994, p. 1903-1906.
- [26] MEEKS, S. and TING, R. The evaluation of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, vol. 75, p. 1010.
- [27] TANCRELL, RH., WILSON, DT. and RICKETTS, D. Properties of PVDF polymer for sonar. *1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1985, p. 624-627.
- [28] HERMAN, BA. and HARRIS, GR. Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, p. 1357-1363.
- [29] PINKERTON, JMM. The absorption of ultrasonic waves and liquids and its relation to molecular constitution. *Proc. Phys. Soc.*, 1949, vol. 62, p. 129-141.
- [30] CORBETT, SS. The influence of nonlinear fields on miniature hydrophone calibration using the planar scanning technique. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 162-167.
- [31] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., GOLDSTEIN, A. and NOWICKI, A. Hydrophone spatial averaging corrections from 1-40 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2001, vol. 48, iss. 6, p. 1575-1580.
- [32] RADULESCU, EG., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. 1-60 MHz Measurements in Focused Acoustic Fields using Spatial Averaging Corrections. *Ultrasonics*, May 2002, vol. 40, iss. 1-8, p. 497-501.

- [33] AIUM/NEMA. *Safety standard for diagnostic ultrasound equipment*. (AIUM/NEMA Standard Publication No. UL 1-1981). Laurel, MD: American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM); Rosslyn, VA: National Electrical Manufacturers Association (NEMA).
- [34] BACON, DR., A new method for ultrasonic hydrophone calibration. *1982 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1982, p. 700-704.
- [35] LOCKWOOD, JC., MUIR, TG. and BLACKSTOCK, DT. Directive harmonic generation in the radiation field of a circular piston. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1973, vol. 53, p. 1148-1153.
- [36] DEL GROSSO, VA. and MADER, CW. Speed of sound in pure water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972, vol. 52, p. 1442-1446.
- [37] BILANIUK, N. and WONG, GSK. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, vol. 93, p.2306.
- [38] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. Nonlinear propagation model for ultrasound hydrophones calibration in the frequency range up to 100 MHz. *Ultrasonics*, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 239-245.
- [39] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., WÓJCIK, J. and NOWICKI, A. Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves. *Ultrasonics*, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 247-254.
- [40] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. A new method of ultrasonic hydrophone calibration using KZK wave modeling. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 103 p. 2962.
- [41] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. A novel method for determining calibration and behavior of PVDF ultrasonic hydrophone probes in the frequency range up to 100 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1354-1362.
- [42] LEWIN, PA., UMCHID, S., SUTIN, A. and SARVAZYAN, A. Beyond 40 MHz frontier: the future technologies for calibration and sensing of acoustic fields. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2004, vol. 1, p. 38-43.
- [43] REIBOLD, R. and MOLKENSTRUCK, W. Investigation of pulse-excited hydrophones for ultrasonic field measurements using laser interferometry. *Ultrasonics*, March 1987, vol. 25, iss. 2, p. 114-118.
- [44] SCRUBY, CB. and DRAIN, LE. *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Bristol: Adam Hilger, 1990.
- [45] KOCH, Ch., LUDWIG, G. and MOLKENSTRUCK, W. Calibration of an interferometric fiber tip sensor for ultrasound detection. *Ultrasonics*, June 1997, vol. 35, iss. 4, p. 297-303.
- [46] KOCH, C. and MOLKENSTRUCK, W. Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, September 1999, vol. 46, iss. 5, p. 1303-1314.
- [47] BACON, DR. Primary calibration of ultrasonic hydrophone using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 152-161.
- [48] BACON, DR. and ROBINSON, SP. *Intercomparison of 1 mm hydrophone calibrations in the frequency range 0.5 to 15 MHz*. (Report EUR 13525 EN). Bureau Communautaire de Référence, Commission of the European Communities, 1991.

- [49] ROBINSON, SP., BACON, DR. and MOSS, BC. The measurement of the frequency response of a photodiode and amplifier using an opto-mechanical frequency response calibrator. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, vol. 1, p. 1184-1187.
- [50] ESWARD, TJ. and ROBINSON, SP. Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, May 1999, vol. 46, iss. 3, p. 737-744.
- [51] PRESTON, RC., BACON, DR., LIVETT, AJ. and RAJENDRAN, K. PVDF membrane hydrophone performance properties and their relevance to the measurement of the acoustic output of medical ultrasonic equipment. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1983, vol. 16, p. 786-796.
- [52] SMITH, RA. and BACON, DR. A multiple-frequency hydrophone calibration technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, p. 2231-2243.
- [53] BACON, DR. Nonlinear acoustics in ultrasound calibration and standards. In HAMILTON, MF. and BLACKSTOCK, DT., eds., *Frontiers of nonlinear acoustics*. 12th ISNA. Elsevier, 1990, p. 3-19.
- [54] HARRIS, GR. and SHOMBERT, DG. A pulsed near-field technique for measuring the directional characteristics of acoustic receivers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1985, vol. 32, no. 6, p. 802-808.
- [55] LEWIN, PA. Calibration and performance evaluation of miniature ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry. *1981 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 1981, p. 660-664.
- [56] LUDWIG, G. and BRENDDEL, K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 168-174.
- [57] BEYER, RT. Parameter of nonlinearity in fluids. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1960, vol. 32, p. 719-721.
- [58] MUIR, TG. and CARSTENSEN, EL. Prediction of nonlinear acoustic effects at biomedical frequencies and intensities. *Ultrasound Med. Biol.*, 1980, vol. 6, no., 4, p. 345-357.
- [59] SELFRIDGE, A. and LEWIN, PA. Wideband Spherically Focused PVDF Acoustic Sources for Calibration of Ultrasound Hydrophone Probes. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1372-1376.
- [60] HARRIS, GR., CAROME, EF. and DARDY, HD. An analysis of pulsed ultrasonic fields as measured by PVDF spot-poled membrane hydrophones. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, September 1983, vol. SU-30, no. 5, p. 295-303.
- [61] BABOUX, JC., LAKESTANI, F. and PERDRIX, M. Theoretical and experimental study of the contribution of radial modes to the pulsed ultrasonic field radiated by a thick piezoelectric disk. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, vol. 75, p. 1722-1731.
- [62] HEYSER, RC. Acoustical measurements by time delay spectrometry. *J. Audio Eng. Soc.*, 1967, vol. 15, p. 370.
- [63] PEDERSON, PC., LEWIN, PA. and BJORNO, L. Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 185-205.

- [64] CHIVERS, RC. Time-delay spectrometry for ultrasonic transducer characterization. *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, 1986, vol. 19, p. 834-843.
- [65] GAMMELL, PM. Time and frequency domain measurements of materials with high ultrasonic attenuation using time domain spectroscopy. In THOMPSON, DO. and CHIMENTI, DE., eds, *Review of Progress in Quantitative NDE*. Plenum Press, 1986, vol. 5, p. 759-656.
- [66] LEWIN, PA. Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes. *Ultrasonics*, September 1981, vol. 19, iss. 5, p. 213-216.
- [67] LEWIN, PA. and SCHAFER, ME. Ultrasonic probes in measurement practice. *Medical Device and Diagnostic Industry*, 1986, vol. 8, no. 5, p. 40-45.
- [68] GAMMELL, PM. and HARRIS, GR. Time delay spectrometry for hydrophone calibrations below 1 MHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 106, L41-6.
- [69] KOCH, C. Amplitude and Phase Calibration of Hydrophones by Heterodyne and Time-gated Time-delay Spectrometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, March 2003, vol. 50, iss. 3, p. 344-348.
- [70] WILKENS, V. Characterization of an optical multilayer hydrophone with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, vol. 113, p. 1431-38.
- [71] WILKENS, V. and KOCH, C. Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping. *Opt. Lett.*, 1999, vol. 24, no. 15, p. 1026-1028.
- [72] WILKENS, V. and KOCH, C. Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, p. 2892-2903.
- [73] HUMPHREY, VF., COOLING, MP., DUNCAN, TM. and DUCK, F. *Measurement of the phase response of a membrane hydrophone and its application to ultrasonic field characterisation*. Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine (AMUM) conference, Teddington, UK, 27-28 April 2004.
- [74] ZEQRIRI, B. and BOND, AD. The influence of waveform distortion on hydrophone spatial-averaging corrections – Theory and measurement. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, vol. 92, p. 1809-1821.

NOTE γ est désigné par α dans [74].

- [75] DU, G. and BREAZEALE, MA. Harmonic distortion of a finite amplitude Gaussian beam in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, vol. 80, p. 212-216.
- [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

Documents CEI connexes

CEI 60050-802, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 802: Ultrasons*

IEC/TS 62781 *Ultrasonics – Conditioning of water for ultrasonic measurements* (disponible en anglais seulement)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch