

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60565

Deuxième édition
Second edition
2006-11

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

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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60565:2006

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60565

Deuxième édition
Second edition
2006-11

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

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

© IEC 2006 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XC**

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	8
1 Domaine d'application	12
2 Références normatives	12
3 Termes et définitions	12
4 Symboles et termes abrégés	24
5 Procédures d'étalonnage	28
5.1 Principes	28
5.2 Limites de champ	30
5.3 Choix schématique des procédés	30
5.4 Compte-rendu des résultats	30
5.5 Périodes de réétalonnage	32
5.6 Considérations relatives à la température et à la pression pour l'étalonnage	32
6 Préparation des transducteurs	32
6.1 Mouillage	32
6.2 Support de l'hydrophone	32
6.3 Influence du câble	32
7 Mesures électriques	34
7.1 Forme du signal	34
7.2 Mise à la terre	34
7.3 Mesure de la tension de sortie de l'hydrophone	34
7.4 Mesure du courant traversant le projecteur	36
7.5 Mesure de l'impédance de transfert	38
8 Etalonnage en champ libre par réciprocity	38
8.1 Principe général	38
8.2 Théorie	40
8.3 Distance de séparation	50
8.4 Distance minimale entre transducteurs et surfaces délimitantes	50
8.5 Limites en fréquence	50
8.6 Mesures et vérifications	52
8.7 Incertitude	58
9 Etalonnage en champ libre par comparaison	58
9.1 Principe	58
9.2 Comparaison avec un hydrophone étalon	58
9.3 Etalonnage avec un projecteur étalonné	60
10 Etalonnage par excitation hydrostatique	62
10.1 Principe	62
10.2 Détermination de la pression équivalente	62
10.3 Mesure de la sensibilité des hydrophones	70
10.4 Conception du système de vibration	72
10.5 Incertitude	74
10.6 Méthode alternative pour l'excitation hydrostatique	74
11 Etalonnage par compensation piézo-électrique	74
11.1 Principe	74
11.2 Procédure	76

CONTENTS

FOREWORD.....	9
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	13
4 Symbols and abbreviated terms.....	25
5 Procedures for calibrations	29
5.1 Principles	29
5.2 Field limitations	31
5.3 Schematic survey of procedures.....	31
5.4 Reporting of results	31
5.5 Recalibration periods.....	33
5.6 Temperature and pressure considerations for calibration.....	33
6 Preparation of transducers	33
6.1 Wetting.....	33
6.2 Hydrophone support	33
6.3 Influence of cable	33
7 Electrical measurements	35
7.1 Signal type	35
7.2 Earthing	35
7.3 Measurement of hydrophone output voltage.....	35
7.4 Measurement of projector current.....	37
7.5 Measurement of transfer impedance.....	39
8 Free-field reciprocity calibration.....	39
8.1 General principle.....	39
8.2 Theory.....	41
8.3 Separation distance.....	51
8.4 Minimum distance from transducers to boundary surface.....	51
8.5 Frequency limitation.....	51
8.6 Measurements and checks	53
8.7 Uncertainty.....	59
9 Free-field calibration by comparison	59
9.1 Principle.....	59
9.2 Comparison with a standard hydrophone	59
9.3 Calibration with a calibrated projector.....	61
10 Calibration by hydrostatic excitation	63
10.1 Principle.....	63
10.2 Determination of equivalent pressure	63
10.3 Measurement of the sensitivity of hydrophones	71
10.4 Design of vibration system	73
10.5 Uncertainty.....	75
10.6 Alternative method for hydrostatic excitation	75
11 Calibration by piezoelectric compensation	75
11.1 Principle.....	75
11.2 Procedure	75

11.3	Conception de la chambre d'étalonnage	80
11.4	Limites pratiques de la méthode de compensation piézo-électrique	84
11.5	Incertitude	84
12	Etalonnage par réciprocité du coupleur acoustique	84
12.1	Principe	84
12.2	Procédure	84
12.3	Théorie	86
12.4	Elasticité acoustique	88
12.5	Limite de haute fréquence	88
12.6	Limite de basse fréquence	88
12.7	Mesure	88
12.8	Incertitude	90
12.9	Limites	90
12.10	Etalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur de référence avec deux transducteurs réciproques et un coupleur auxiliaire avec les deux mêmes transducteurs et un hydrophone à étalonner	90
12.11	Etalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur de référence avec deux transducteurs réciproques et un coupleur auxiliaire avec les deux mêmes transducteurs, un hydrophone à étalonner et une source sonore	94
12.12	Etalonnage du coupleur acoustique à l'aide d'un coupleur, d'un transducteur réciproque, d'un projecteur, d'un hydrophone à étalonner, et d'un organe subsidiaire d'élasticité connue	98
13	Etalonnage avec un pistonphone	102
13.1	Principe	102
13.2	Procédure	102
13.3	Limites	108
13.4	Incertitude	110
14	Etalonnage avec une colonne vibrante	110
14.1	Principe	110
14.2	Procédure	112
14.3	Expression pour la pression	114
14.4	Détermination de la sensibilité	114
14.5	Conditions de mesure	118
14.6	Incertitude	120
Annexe A (informative)	Réponse directionnelle d'un hydrophone	122
Annexe B (informative)	Corrections de la charge électrique	126
Annexe C (informative)	Techniques par impulsions dans les étalonnages en champ libre	130
Annexe D (informative)	Evaluation de l'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones	148
Annexe E (informative)	Circuit équivalent du système d'excitation pour l'étalonnage avec une colonne vibrante	156
Bibliographie		158

11.3	Design of the calibration chamber	81
11.4	Practical limitations of the piezoelectric compensation method	85
11.5	Uncertainty	85
12	Acoustic coupler reciprocity calibration	85
12.1	Principle	85
12.2	Procedure	85
12.3	Theory	87
12.4	Acoustic compliance	89
12.5	High-frequency limit	89
12.6	Low-frequency limit	89
12.7	Measurement	89
12.8	Uncertainty	91
12.9	Limitations	91
12.10	Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers and a hydrophone to be calibrated	91
12.11	Acoustic-coupler calibration using a reference coupler with two reciprocal transducers and an auxiliary coupler with the same two transducers, a hydrophone to be calibrated, and a sound source	95
12.12	Acoustic-coupler calibration using a coupler, a reciprocal transducer, a projector, a hydrophone to be calibrated, and a subsidiary body of known compliance	99
13	Calibration with a pistonphone	103
13.1	Principle	103
13.2	Procedure	103
13.3	Limitations	109
13.4	Uncertainty	111
14	Calibration with a vibrating column	111
14.1	Principle	111
14.2	Procedure	113
14.3	Expression for the pressure	115
14.4	Determination of the sensitivity	115
14.5	Conditions of measurement	119
14.6	Uncertainty	121
Annex A (informative)	Directional response of a hydrophone	123
Annex B (informative)	Electrical loading corrections	127
Annex C (informative)	Pulsed techniques in free-field calibrations	131
Annex D (informative)	Assessment of uncertainty in the calibration of hydrophones	149
Annex E (informative)	Equivalent circuit of the excitation system for calibration with a vibrating column	157
Bibliography		159

Figure 1 – Système de coordonnées dans le sens des aiguilles d'une montre	14
Figure 2 – Cadre de mesure pour soutenir les trois transducteurs en ligne: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner.	48
Figure 3 – Schéma de la méthode de l'excitation hydrostatique	64
Figure 4 – Schéma du système de mesure.....	76
Figure 5 – Schéma de la chambre pour hautes fréquences	82
Figure 6 – Coupleur de réciprocité avec trois transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner.....	86
Figure 7 – Coupleur de référence avec deux transducteurs: un projecteur P et un transducteur réciproque T	92
Figure 8 – Coupleur auxiliaire avec trois transducteurs: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner.....	92
Figure 9 – Coupleur auxiliaire avec quatre transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T, une source sonore S, et un hydrophone H à étalonner.....	96
Figure 10 – Schéma du système de mesure.....	102
Figure 11 – Pistonphone	110
Figure 12 – Colonne vibrante.....	112
Figure C.1 – Schéma d'un projecteur et d'un récepteur dans une cuve remplie d'eau présentant les sources principales de réflexions.....	134
Figure C.2 – Instant d'arrivée de l'écho dans une cuve de 6 m × 6 m × 5 m avec des transducteurs placés de façon optimale.....	136
Figure C.3 – Signaux d'hydrophones pour un couple de transducteurs sphériques [projecteur: fréquence de résonance de 18 kHz, facteur Q de 3,5; hydrophone: fréquence de résonance de 350 kHz; fréquence de fonctionnement: 2 kHz (gauche) et 18 kHz (droite)].....	138
Figure E.1 – Circuit équivalent simplifié de la colonne vibrante	156

Figure 1 – Left-hand co-ordinate system	15
Figure 2 – Measurement framework for supporting in-line the three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated.....	49
Figure 3 – Diagram of the method of hydrostatic excitation.....	65
Figure 4 – Schematic drawing of the measuring system.....	77
Figure 5 – Diagram of the chamber for high-frequency.....	83
Figure 6 – Reciprocity coupler with three transducers; a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated.....	87
Figure 7 – Reference coupler with two transducers: a projector P and a reciprocal transducer T	93
Figure 8 – Auxiliary coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated.....	93
Figure 9 – Auxiliary coupler with four transducers; a projector P, a reciprocal transducer T, a sound source S, and a hydrophone H to be calibrated.....	97
Figure 10 – Schematic drawing of the measuring system.....	103
Figure 11 – Pistonphone	111
Figure 12 – Vibrating column	113
Figure C.1 – Schematic diagram of a projector and receiver in a water tank showing the main sources of reflections	135
Figure C.2 – Echo arrival time in a 6 m × 6 m × 5 m tank with optimally placed transducers.....	137
Figure C.3 – Hydrophone signals for a pair of spherical transducers [projector: 18 kHz resonance frequency, Q factor of 3,5; hydrophone: 350 kHz resonance frequency; drive frequency: 2 kHz (left) and 18 kHz (right)]	139
Figure E.1 – Simplified equivalent circuit of the vibrating column	157

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES –
ÉTALONNAGE DANS LA BANDE DE FRÉQUENCES
DE 0,01 Hz À 1 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 n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60565 a été établie par le comité d'études 87 de la CEI: Ultrasons.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1977 et son premier complément CEI 60565A (1980). Cette édition constitue une révision technique. Les modifications techniques significatives par rapport à l'édition antérieure sont les suivantes:

- Mise à jour des procédures prenant en compte l'utilisation des techniques numériques d'acquisition et de traitement des signaux, par opposition aux techniques analogiques décrites dans la première édition;
- inclusion d'une information plus détaillée relative à la préparation des hydrophones pour la mesure, et des influences des conditions environnementales sur l'étalonnage de l'hydrophone;
- révision des procédures d'étalonnage de la réponse de l'hydrophone par réciprocité;
- inclusion des procédures d'étalonnage de phase dans la méthode par réciprocité;

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES –
CALIBRATION IN THE FREQUENCY RANGE
0,01 Hz TO 1 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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60565 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1977 and its first supplement IEC 60565A (1980). This edition constitutes a technical revision. The significant technical changes with respect to the previous edition are as follows:

- updating of procedures to reflect the use of digital acquisition and signal processing techniques as opposed to the analogue techniques described in the first edition;
- inclusion of more detailed information regarding the preparation of hydrophones for measurement, and the influences of environmental conditions on hydrophone calibration;
- revision of procedures for magnitude calibration of hydrophone response by the method of three-transducer spherical-wave reciprocity;
- inclusion of procedures for phase calibration into the method of three-transducer spherical-wave reciprocity;

- révision des procédures d'étalonnage des hydrophones par comparaison;
- inclusion des procédures d'étalonnage des hydrophone à basse fréquence par la méthode d'excitation hydrostatique;
- révision des procédures d'étalonnage des hydrophone à basse fréquence par compensation piézo-électrique;
- révision des procédures d'étalonnage des hydrophone à basse fréquence par réciprocité;
- révision des procédures d'étalonnage des hydrophone à basse fréquence avec un pistonphone;
- révision des procédures d'étalonnage des hydrophone à basse fréquence avec une colonne vibrante;
- suppression de l'Annexe A de la première édition (mesure du module de l'impédance de transfert par la méthode de substitution) étant donné que cette méthode n'est plus utilisée;
- suppression de l'Annexe B de la première édition (mesure du module de l'impédance de transfert par la méthode de lecture directe) étant donné que cette méthode n'est plus utilisée;
- maintien de l'Annexe C de la première édition, mais mise à jour de façon substantielle;
- maintien de l'Annexe D de la première édition qui devient l'Annexe A de la présente édition;
- ajout d'une nouvelle Annexe B comportant une description de la manière de prendre en compte l'influence de la charge électrique;
- ajout d'une nouvelle Annexe D sur l'évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones;
- ajout d'une nouvelle Annexe E sur un circuit équivalent du système d'excitation pour l'étalonnage avec une colonne vibrante.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
87/357/FDIS	87/360/RVD

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

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance 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.

- revision of procedures for calibration of hydrophones by the comparison methods;
- inclusion of procedures for low frequency hydrophone calibration utilising the method of hydrostatic excitation;
- revision of the procedures for low frequency hydrophone calibration utilising the method of piezoelectric compensation;
- inclusion of procedures for low frequency hydrophone calibration utilising the method of coupler reciprocity;
- revision of the procedures for low frequency hydrophone calibration utilising the pistonphone method;
- revision of procedures for low frequency hydrophone calibration utilising the method of vibrating column (previously issued as a supplement to the standard);
- deletion of Appendix A of first edition (transfer impedance by substitution method) since method no longer used;
- deletion of Appendix B of first edition (transfer impedance by direct read-out method) since method no longer used;
- retention of Appendix C of first edition, but now substantially updated and included as Annex C (informative);
- retention of Appendix D of first edition, now included as Annex A (informative);
- addition of new Annex B describing methods for accounting for electrical loading of hydrophones by pre-amplifiers;
- addition of new Annex D describing the assessment of uncertainty in free-field hydrophone calibrations;
- addition of new Annex E describing an equivalent electrical circuit of the excitation system for calibration with a vibrating column.

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

FDIS	Report on voting
87/357/FDIS	87/360/RVD

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

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result 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.

ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES – ETALONNAGE DANS LA BANDE DE FRÉQUENCES DE 0,01 Hz À 1 MHz

1 Domaine d'application

La présente Norme Internationale spécifie des méthodes pour l'étalonnage des hydrophones ou des transducteurs réversibles utilisés comme des hydrophones, en particulier dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à 1 MHz. Les règles de présentation des résultats d'étalonnage sont établies.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-801, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

CEI 60500:1974, *Hydrophone étalon CEI*

CEI 60866:1987, *Caractéristiques et étalonnage des hydrophones pour fonctionnement dans la gamme de 0,5 MHz à 15 MHz*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

perte de déviation angulaire

différence entre le niveau de sensibilité du transducteur correspondant à l'axe de référence et son niveau de sensibilité pour une direction spécifiée

[VEI 801-25-69]

3.2

système de coordonnées

système utilisé pour désigner le modèle directionnel du transducteur

UNDERWATER ACOUSTICS – HYDROPHONES – CALIBRATION IN THE FREQUENCY RANGE 0,01 Hz TO 1 MHz

1 Scope

This International Standard specifies methods for calibration of hydrophones or reversible transducers when used as a hydrophone, particularly in the frequency range from 0,01 Hz to 1 MHz. Rules for the presentation of the calibration data are established.

2 Normative references

The following referenced data 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, *International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

IEC 60500:1974, *IEC Standard hydrophone*

IEC 60866:1987, *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

angular deviation loss

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

[IEV 801-25-69]

3.2

co-ordinate system

system used to designate the directivity pattern of the transducer

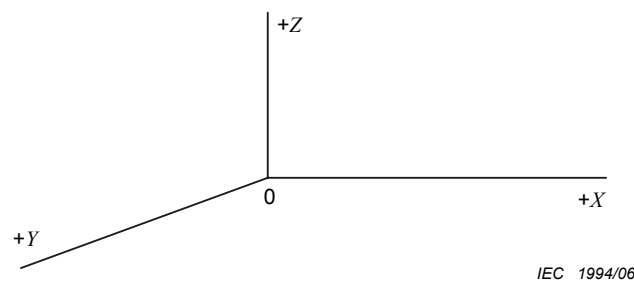


Figure 1 – Système de coordonnées dans le sens des aiguilles d'une montre

Transducteur *ligne*: ligne centrale de symétrie le long de l'axe Z;

Transducteur *dipôle*: les deux éléments symétriques par rapport à l'origine, sur l'axe +Z et –Z;

Transducteur *piston*: plan du piston dans le plan ZOY; axe principal colinéaire à l'axe X.

NOTE 1 Les termes 'diagramme directionnel horizontal' et 'diagramme directionnel vertical' sont souvent utilisés pour la représentation de la directivité dans les plans XY- et XZ- (ou YZ-), respectivement.

NOTE 2 Voir l'Annexe A, [1]¹⁾, [2].

3.3

coupleur

appareil comprenant une chambre rigide de petites dimensions, remplie de fluide, dans laquelle les transducteurs et les hydrophones peuvent être insérés

3.4

facteur de diffraction

rapport de la pression moyenne sur la partie de l'hydrophone destinée à recevoir le son, à la pression acoustique en champ libre qui existerait au niveau du centre de référence de l'hydrophone

3.5

réponse directionnelle

description, généralement présentée sous forme de graphique, de la réponse d'un transducteur électroacoustique en fonction de la direction de propagation du son rayonné ou incident, dans un plan défini passant par le centre de référence et à une fréquence donnée

NOTE Voir l'Annexe A.

3.6

dynamique

rapport de la pression acoustique maximale en champ libre, qui crée à la sortie de l'hydrophone un signal sans distorsion, à la pression de bruit équivalente de l'hydrophone

3.7

impédance électrique d'un transducteur

rapport complexe de la tension instantanée appliquée entre les bornes électriques d'un transducteur au courant instantané résultant, à une fréquence donnée

NOTE 1 Unité: ohm, Ω .

NOTE 2 Etant donné que l'impédance électrique dépend des conditions d'environnement, de la pression hydrostatique, de la température de l'eau et de la longueur du câble de liaison du transducteur, il convient que ces paramètres, ainsi que la fréquence et le repère des bornes électriques de mesure de l'impédance électrique, soient précisés.

¹⁾ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

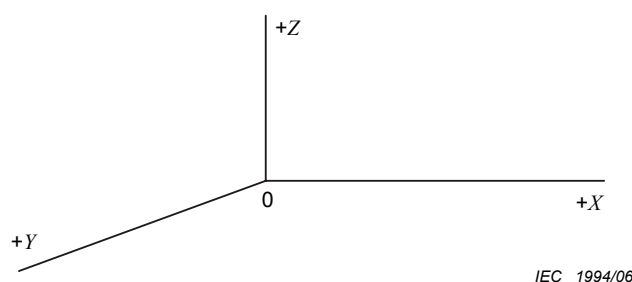


Figure 1 – Left-hand co-ordinate system

Line transducer: central line of symmetry along the Z-axis;

Dipole transducer: both components equidistant from the origin, along the +Z and –Z axis;

Piston transducer: piston plane in ZOY-plane; principal axis along X-axis.

NOTE 1 The terms 'horizontal directivity pattern' and 'vertical directivity pattern' are often used for representation of directivity in the XY- and XZ- (or YZ-) planes respectively.

NOTE 2 See Annex A, [1]¹, [2].

3.3 coupler

apparatus comprising a rigid fluid-filled chamber of small dimensions into which transducers and hydrophones can be inserted

3.4 diffraction factor

ratio of the average pressure over the part of the hydrophone designed to receive sound to the free-field sound pressure that would exist at the reference centre of the hydrophone

3.5 directional response

description, generally presented graphically, of the response of an electro-acoustic transducer, as a function of the direction of propagation of the radiated or incident sound in a specified plane through the reference centre and at a specified frequency

NOTE See Annex A.

3.6 dynamic range

ratio of the maximum free field sound pressure that produces an undistorted hydrophone output to the equivalent noise pressure at the hydrophone

3.7 electrical impedance of a transducer

complex ratio of the instantaneous voltage applied across the electrical terminals of a transducer at a given frequency, to the resulting instantaneous current

NOTE 1 The unit is the ohm, Ω .

NOTE 2 Because the electrical impedance depends on the field conditions, the hydrostatic pressure, water temperature and the length of the cable attached to the transducer, these parameters, as well as the frequency and the electrical terminals where the electrical impedance is measured should be specified.

¹ Numbers in square brackets refer to the bibliography

3.8

bornes électriques d'un transducteur réciproque

bornes au niveau desquelles la tension en circuit ouvert en fonctionnement en hydrophone ainsi que le courant absorbé en fonctionnement en projecteur sont mesurés

NOTE Lorsque le transducteur est immergé dans l'eau, on appelle 'borne basse' la borne électrique dont l'impédance électrique par rapport à l'eau est la plus faible. Par conséquent, l'autre borne électrique est appelée 'borne haute'.

3.9

module de l'impédance électrique de transfert

module de l'impédance électrique de transfert d'un couple de transducteurs

NOTE Unité: ohm, Ω .

3.10

impédance électrique de transfert d'un couple de transducteurs

rapport complexe de la tension instantanée en circuit ouvert U_H recueillie aux bornes électriques de l'hydrophone au courant instantané I_P traversant le projecteur, si le projecteur et l'hydrophone sont placés en champ libre, leurs axes principaux étant alignés et dirigés l'un vers l'autre

$$\text{NOTE 1 } Z_{PH} = \frac{U_H}{I_P} \quad (1)$$

NOTE 2 Unité: ohm, Ω .

NOTE 3 L'impédance électrique de transfert est une grandeur complexe. Elle possède à la fois des composantes réelles et imaginaires et peut être représentée comme un module $|Z_{PH}|$ fois un terme de phase $\exp(j\varphi)$, où φ est l'angle de phase entre les composantes réelles et imaginaires d'impédance.

NOTE 4 La définition de l'axe principal est donnée en 3.23.

NOTE 5 Voir 7.5.

3.11

pression de bruit équivalente

pression acoustique appliquée à l'hydrophone pour que sa tension de sortie, en l'absence de bruit, soit égale à la tension de bruit mesurée aux mêmes bornes électriques en l'absence de pression acoustique

NOTE Lorsque la pression de bruit équivalente ne peut être mesurée, elle peut être calculée à partir de la résistance équivalente en série [2].

3.12

champ lointain

champ acoustique à une distance de la source acoustique où les valeurs instantanées de la pression acoustique et de la vitesse des particules du fluide sont pratiquement en phase

NOTE 1 Dans le champ lointain, la pression acoustique semble correspondre à une divergence sphérique à partir d'un point situé sur ou au voisinage de la surface rayonnante. En conséquence, la pression due à la source acoustique est inversement proportionnelle à la distance de la source.

NOTE 2 En pratique, pour tous les étalonnages, la distance entre la source acoustique et le point de mesure de la pression est suffisamment grande pour que la pression acoustique soit mesurée dans le champ lointain de la source.

3.13

champ libre

champ acoustique se développant dans un milieu homogène et isotrope dans lequel les effets des limites sont négligeables

3.8**electrical terminals of a reciprocal transducer**

terminals across which the open circuit hydrophone voltage, as well as the projector current are measured

NOTE If the transducer is immersed in water, the electrical terminal with the lowest electrical impedance with respect to water is called the 'low terminal'. Consequently, the other electrical terminal is called the 'high terminal'.

3.9**electrical transfer impedance magnitude**

magnitude of the electrical transfer impedance of a transducer pair

NOTE The unit is the ohm, Ω .

3.10**electrical transfer impedance of a transducer pair**

complex ratio of the open circuit instantaneous voltage U_H across the hydrophone electrical terminals to the instantaneous current I_p through the projector, if projector and hydrophone are mounted in a free field with their principal axes in line and directed towards each other

$$\text{NOTE 1 } Z_{PH} = \frac{U_H}{I_p} \quad (1)$$

NOTE 2 The unit is the ohm, Ω .

NOTE 3 The electrical transfer impedance is a complex quantity. It has both real and imaginary components and can be represented as a magnitude $|Z_{PH}|$ times a phase term $\exp(j\varphi)$, where φ is the phase angle between the real and imaginary impedance components.

NOTE 4 The definition of principal axis is given in 3.23.

NOTE 5 See 7.5.

3.11**equivalent noise pressure**

sound pressure applied at the hydrophone to cause a voltage at the hydrophone electrical terminals, in the absence of noise, that is equal to the noise voltage present at the same electrical terminals when the sound pressure is absent

NOTE When the equivalent noise pressure cannot be measured, it can be calculated from the equivalent series resistance [2].

3.12**far field**

sound field at a distance from the sound source where the instantaneous values of sound pressure and particle velocity are substantially in phase

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 inversely proportional to the distance from that source.

NOTE 2 For all practical calibrations, the separation distance between the sound source and the point where the pressure is measured is sufficiently large that the sound pressure is measured in the far field of the source.

3.13**free field**

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

3.14

niveau de sensibilité en champ libre

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

NOTE 1 Unité: décibel, dB.

NOTE 2 M_{ref} est égale à $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

NOTE 3 Les unités qui diffèrent par un facteur 10 à la puissance de n , (n étant un nombre entier positif ou négatif) peuvent être utilisées suivant les règles générales du SI. On indique, dans ce cas, la valeur de M_{ref} .

3.15

sensibilité en champ libre d'un hydrophone

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 Unité: volt par pascal, $\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

NOTE 2 La pression est sinusoïdale.

NOTE 3 Le terme de "réponse" est parfois employé à la place de "sensibilité".

3.16

hydrophone

transducteur qui produit un signal électrique sous l'effet de signaux acoustiques transmis dans l'eau

NOTE La plupart des hydrophones sont réciproques et satisfont au principe de réciprocité. Ils peuvent donc fonctionner comme projecteurs, à moins d'être équipés de façon permanente d'un préamplificateur.

3.17

incertitude de mesure

plage de valeurs entourant une valeur mesurée qui a une probabilité spécifiée de contenir la valeur correcte pour la grandeur mesurée

NOTE Les incertitudes données dans la présente norme représenteront l'incertitude épuisée et seront identifiées avec des limites de confiance de 95 %. Les facteurs d'incertitude comprennent le type A, c'est-à-dire ceux qui sont évalués en utilisant des méthodes statistiques et le type B, c'est-à-dire ceux qui sont évalués par d'autres moyens [3], voir l'Annexe D.

3.18

directivité isotrope

réponse d'un transducteur qui reste comprise entre certaines limites lorsqu'on change de direction

NOTE La directivité isotrope dans un espace à deux dimensions peut se produire dans un seul plan alors que, dans un espace à trois dimensions, un transducteur peut être omnidirectionnel en tout plan passant par le centre de référence.

3.19

tension en circuit ouvert d'un hydrophone

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

NOTE 1 Unité: volt, V.

NOTE 2 Dans la présente norme, tous les courants, tensions et pressions acoustiques sont exprimés en valeurs efficaces, sauf indication contraire.

3.20

pistonphone

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

NOTE Il convient que la plus grande dimension du volume clos soit suffisamment faible par rapport à la longueur d'onde du son dans le milieu considéré. Voir l'Article 13.

3.14**free-field sensitivity level**

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

NOTE 1 The unit is the decibel, dB.

NOTE 2 M_{ref} is equal to $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

NOTE 3 The use of units differing by a factor 10 to the power of n , (n being a positive or negative whole number) is allowed in accordance with the general rules for the SI system. In such cases, the value of M_{ref} is specially indicated.

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

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 unit is the volt per pascal, $\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

NOTE 2 The pressure is sinusoidal.

NOTE 3 The term 'response' is sometimes used instead of 'sensitivity'.

3.16**hydrophone**

transducer that produces electric signals in response to water borne acoustic signals

NOTE Most hydrophones are reversible and satisfy the principle of reciprocity. Consequently, they may operate as projectors, unless they are permanently equipped with a preamplifier.

3.17**measurement uncertainty**

range of values surrounding a measured value that has a specified probability of containing the correct value for the quantity being measured

NOTE Uncertainties given in this standard will represent expanded uncertainty and be identified with 95 % confidence limits. Components of uncertainty include Type A, those that are evaluated by statistical methods and Type B, those that are evaluated by other means [3], see Annex D.

3.18**omnidirectionality**

transducer response which shows variations smaller than a given limit as the direction is changed

NOTE Omnidirectionality in a two-dimensional space can occur in one plane only, while in three dimensions a transducer can be omnidirectional in all planes through the reference centre.

3.19**open-circuit voltage at hydrophone**

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

NOTE 1 The unit is the volt, V.

NOTE 2 Throughout this standard, all voltages, currents and sound pressures are root mean square quantities, unless otherwise stated.

3.20**pistonphone**

apparatus having a rigid piston which can be given a reciprocating motion of a known frequency and amplitude, so permitting the establishment of a known sound pressure in a closed chamber of small dimensions

NOTE The largest dimension of the enclosed space should be sufficiently small compared with the wavelength of the sound in the acoustic medium. See Clause 13.

3.21

niveau de sensibilité en pression

vingt fois le logarithme à base 10 du rapport de la sensibilité en pression M_p à la sensibilité de référence M_{ref}

NOTE 1 Unité: décibel, dB.

NOTE 2 Voir 3.10, Notes 3 et 4.

3.22

sensibilité en pression d'un hydrophone

rapport de la tension de sortie à la pression acoustique existant réellement dans la région de l'hydrophone destinée à recueillir les signaux sonores

NOTE 1 Voir 3.15, NOTES 2 et 3.

NOTE 2 Unité: volt par pascal, $V \cdot Pa^{-1}$

3.23

axe principal

direction de référence servant d'origine de coordonnées angulaires pour la description des caractéristiques de directivité du transducteur

NOTE 1 En général, on choisit l'axe de symétrie structurale ou la direction de réponse maximale comme axe principal.

NOTE 2 La direction de réponse maximale peut varier avec la fréquence du son.

3.24

transducteur réciproque

transducteur linéaire, passif, réversible

NOTE Parmi les exemples de transducteurs non réciproques, on peut citer un transducteur qui associe un dispositif de champ magnétique à un dispositif de champ électrique.

3.25

centre de référence

point sur ou au voisinage d'un transducteur, autour duquel sa sensibilité de réception acoustique et les réponses à l'émission sont définies

NOTE En général, il convient que le centre de référence soit choisi au niveau ou à proximité du centre de la portion active du transducteur. Ceci correspond souvent au centre géométrique du transducteur. Par exemple, il convient que le centre de référence pour un transducteur utilisant une capsule sphérique en céramique piézo-électrique soit situé au centre de la sphère. Il convient que le centre de référence d'un embout sphérique piézo-électrique soit situé sur l'axe de symétrie entre le centre de courbure de l'embout et le centre géométrique de l'embout. Il convient qu'il soit situé plus près du centre géométrique de l'embout pour des angles d'embout plus petits. Dans le cas limité d'un transducteur piston, le centre de référence doit être situé au centre de la face rayonnante du piston. Ce choix tend à réduire l'incertitude de mesure introduite en réalisant des étalonnages à des distances de séparation inférieures à celle requise pour obtenir des conditions de champ lointain. (Voir 3.12).

3.26

transducteur réversible

transducteur pouvant fonctionner aussi bien comme projecteur que comme hydrophone

3.27

niveau de réponse à l'émission en courant

vingt fois le logarithme à base 10 de la réponse à l'émission S rapportée à une réponse de référence S_{ref}

NOTE 1 Unité: décibel, dB.

NOTE 2 S_{ref} est égale à $1 \mu Pa \cdot m \cdot A^{-1}$.

3.21**pressure sensitivity level**

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the pressure sensitivity M_p to a reference sensitivity of M_{ref}

NOTE 1 The unit is the decibel, dB.

NOTE 2 See 3.10, Notes 3 and 4.

3.22**pressure sensitivity of a hydrophone**

ratio of the output voltage to the actual sound pressure existing over the region of the hydrophone designed to receive sound

NOTE 1 See 3.15, NOTES 2 and 3.

NOTE 2 The unit is the volt per pascal, $\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$

3.23**principal axis**

reference direction serving as an origin for angular co-ordinates used in describing the directional characteristics of the transducer

NOTE 1 Generally, the axis of structural symmetry or the direction of maximum response is chosen for the principal axis.

NOTE 2 The direction of maximum response may vary with the frequency of the sound.

3.24**reciprocal transducer**

linear, passive, reversible transducer

NOTE An example of a non-reciprocal transducer is one that mixes a magnetic field device with an electric field device.

3.25**reference centre**

point on or near a transducer about which its acoustic receiving sensitivity and transmitting responses are defined

NOTE Generally, the reference centre should be chosen to be at or near the centre of the active portion of the transducer. This often corresponds to the geometric centre of the transducer. For example, the reference centre for a transducer utilizing a piezoelectric ceramic spherical shell should be located at the centre of the sphere. The reference centre of a piezoelectric spherical cap should be located on the axis of symmetry between the centre of curvature of the cap and the geometric centre of the cap. It should be located closer to the geometric centre of the cap for smaller cap angles. In the limiting case of a piston transducer, the reference centre should be located at the centre of the radiating piston face. This choice tends to minimize the measurement uncertainty introduced by performing calibrations at separation distances less than that required to achieve far-field conditions. (See 3.12).

3.26**reversible transducer**

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

3.27**transmitting current response level**

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the transmitting response S to a reference response S_{ref}

NOTE 1 The unit is the decibel, dB.

NOTE 2 S_{ref} is equal to $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.28

réponse à l'émission en courant d'un projecteur

rapport de la pression acoustique à une distance de référence du centre de référence d'un projecteur (dans une direction déterminée et pour une fréquence donnée), multipliée par la distance de référence, au courant traversant les bornes électriques

NOTE 1 La distance de référence est de 1 m.

NOTE 2 Unité: pascal mètre par ampère, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.29

réponse à l'émission en tension d'un projecteur

rapport de la pression acoustique à une distance de référence du centre de référence d'un projecteur (dans une direction déterminée et pour une fréquence donnée), multipliée par la distance de référence, à la tension aux bornes électriques

NOTE 1 La distance de référence est de 1 m.

NOTE 2 Unité: pascal mètre par volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

3.30

niveau de réponse à l'émission en tension

vingt fois le logarithme à base 10 de la réponse à l'émission S_V , rapportée à une réponse de référence $S_{V,\text{ref}}$

NOTE 1 Unité: décibel, dB.

NOTE 2 $S_{V,\text{ref}}$ est égale à $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

3.31

transducteur point

transducteur isotrope dans toutes les directions et pouvant avoir son axe dans n'importe quelle direction

3.32

transducteur ligne

transducteur omnidirectionnel dans un plan et pouvant avoir son axe sur n'importe quelle droite de ce plan

3.33

transducteur dipôle

transducteur bidirectionnel et ayant deux axes dans des directions opposées

3.34

transducteur à piston plat

transducteur unidirectionnel et ayant son axe unique généralement perpendiculaire à la surface du piston

3.35

transducteur unidirectionnel

transducteur qui est surtout sensible à un son dont l'incidence ou l'émission est comprise dans un angle solide inférieur ou égal à une demi-sphère

NOTE Voir [4] à [7].

3.36

réponse à l'émission en courant d'un transducteur dans une chambre de petites dimensions

rapport de la pression acoustique (supposée uniforme) dans une chambre de petites dimensions, au courant traversant les bornes électriques d'un transducteur à l'intérieur de la chambre, à une fréquence donnée

NOTE Unité: pascal par ampère, $\text{Pa} \cdot \text{A}^{-1}$.

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

ratio of the sound pressure at a reference distance from the reference centre of a projector (at a given frequency and in a specified direction) multiplied by the reference distance, to the current flowing through the electrical terminal.

NOTE 1 Reference distance is 1 m.

NOTE 2 The unit is the pascal metre per ampere, $\text{Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$.

3.29**transmitting response to voltage of a projector**

ratio of the sound pressure at a reference distance from the reference centre of a projector (at a given frequency and in a specified direction), multiplied by the reference distance, to the voltage across the electrical terminals

NOTE 1 Reference distance is 1 m.

NOTE 2 The unit is the pascal metre per volt, $\text{Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$.

3.30**transmitting voltage response level**

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the transmitting response S_V to a reference response $S_{V,\text{ref}}$

NOTE 1 The unit is the decibel, dB.

NOTE 2 $S_{V,\text{ref}}$ is equal to $1\ \mu\text{Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$.

3.31**point transducer**

transducer which is omnidirectional in all planes and may have its axis in any direction

3.32**line transducer**

transducer which is omnidirectional in one plane and may have its axis in any direction within that plane

3.33**dipole transducer**

transducer which is bidirectional and has two axes in opposite directions

3.34**flat piston transducer**

transducer which is unidirectional and has one axis, generally perpendicular to the piston surface

3.35**unidirectional transducer**

transducer which is responsive predominately to sound radiated or incident within a solid angle not greater than one hemisphere

NOTE See [4] to [7].

3.36**small chamber transmitting response to current of a transducer**

ratio of the acoustical pressure (assumed uniform) in a small chamber to the current flowing through the electrical terminals of a transducer inside the chamber at a given frequency

NOTE The unit is the Pascal per ampere, $\text{Pa}\cdot\text{A}^{-1}$.

3.37

projecteur

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

3.38

colonne vibrante

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

NOTE 1 Il convient que la longueur de la colonne soit suffisamment faible par rapport à la longueur d'onde du son dans l'eau. Il convient que le diamètre de la colonne soit faible comparé à sa longueur.

NOTE 2 Voir l'Article 14.

4 Symboles et termes abrégés

Symbole	Signification
A	Surface sensible réelle du transducteur
a	Dimension linéaire du transducteur
B	Densité de flux du champ magnétique à travers la bobine du transducteur
C	Capacité
C_c	Elasticité acoustique des parois de la chambre
C_f	Elasticité acoustique du volume de fluide dans la chambre
C_{mt}	Elasticité mécanique de la chambre
C_t	Elasticité acoustique de la chambre
C_w	Elasticité acoustique du volume d'eau dans la chambre
c	Vitesse du son dans l'eau
c_f	Vitesse du son dans un liquide
D	Diamètre moyen de la capsule cylindrique
D_i	Indice de directivité
d	Distance entre projecteur et hydrophone
d_{31}	Module piézo-électrique
dS	Elément différentiel de surface sur une sphère
E	Module de Young
f	Fréquence
g	Accélération due à la pesanteur
h	Hauteur de la colonne d'eau
I	Courant
I_p	Courant à travers le projecteur
I_T	Courant à travers le transducteur

3.37**projector**

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

3.38**vibrating column**

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

NOTE 1 The length of the column should be sufficiently small compared with the wavelength of the sound in the water. The cross-sectional dimensions of the column should be small compared with its length.

NOTE 2 See Clause 14.

4 Symbols and abbreviated terms

Symbol	Meaning
A	Effective sensitive area of transducer
a	Linear dimension of transducer
B	Flux density of magnetic field through transducer coil
C	Capacitance
C_c	Acoustic compliance of chamber walls
C_f	Acoustic compliance of fluid volume in chamber
C_{mt}	Mechanical compliance of chamber
C_t	Acoustic compliance of chamber
C_w	Acoustic compliance of water volume in chamber
c	Speed of sound in water
c_f	Speed of sound in a fluid
D	Mean diameter of cylindrical shell
D_i	Directivity index
d	Distance between projector and hydrophone
d_{31}	Piezoelectric modulus
dS	Differential area on a sphere
E	Young's modulus
f	Frequency
g	Acceleration due to gravity
h	Height of water column
I	Current
I_p	Current through projector
I_T	Current through transducer

I_c	Courant de compensation à travers le projecteur d'équilibre
K	Constante caractéristique du transducteur d'équilibre piézo-électrique
K_f^2	Facteur de correction
K_0	Coefficient de majoration
l	Longueur de la colonne
l	Largeur de la cuve
M_f	Sensibilité en champ libre
M_H	Sensibilité en champ libre de l'hydrophone
M_M	Sensibilité en pression du microphone
M_T	Sensibilité en champ libre du transducteur
M_P	Sensibilité en champ libre du projecteur
M_p	Sensibilité en pression
m	Masse d'eau à l'intérieur de la chambre
p	Pression acoustique
P	Projecteur
Q	Facteur de qualité
R	Résistance
R_θ	Facteur de directivité
r	Rayon de l'enveloppe du transducteur
S	Réponse à l'émission en courant
S_H	Réponse à l'émission en courant d'un hydrophone utilisé comme projecteur
S_P	Réponse à l'émission en courant d'un projecteur
S_T	Réponse à l'émission en courant d'un transducteur
S_V	Réponse à l'émission en tension d'un projecteur
t	Épaisseur d'une capsule cylindrique
U	Tension
U_c	Tension de compensation au projecteur d'équilibre
U_H	Tension en circuit ouvert d'un hydrophone
U_M	Tension en circuit ouvert d'un microphone
U_P	Tension d'alimentation de projecteur
U_T	Tension d'alimentation de transducteur
U_{PH}	Tension en circuit ouvert d'un hydrophone, à partir d'un projecteur de source sonore
U_{TH}	Tension en circuit ouvert d'un hydrophone, à partir d'un transducteur de source sonore

I_c	Compensation current through null projector
K	Characteristic constant of piezoelectric null transducer
K_f^2	Correction factor
K_0	Increasing factor
l	Length of column
l	Width of tank
M_f	Free-field sensitivity
M_H	Free-field sensitivity of hydrophone
M_M	Pressure sensitivity of microphone
M_T	Free-field sensitivity of transducer
M_P	Free-field sensitivity of projector
M_p	Pressure sensitivity
m	Mass of water inside chamber
p	Sound pressure
P	Projector
Q	Quality factor
R	Resistance
R_θ	Directivity factor
r	Radius of transducer shell
S	Transmitting response to current
S_H	Transmitting response to current of a hydrophone when used as a projector
S_P	Transmitting response to current of a projector
S_T	Transmitting response to current of a transducer
S_V	Transmitting response to voltage of a projector
t	Thickness of cylindrical shell
U	Voltage
U_c	Compensating voltage at null projector
U_H	Open circuit voltage at hydrophone
U_M	Open circuit voltage at microphone
U_P	Transmitting voltage at projector
U_T	Transmitting voltage at transducer
U_{PH}	Open circuit voltage at hydrophone, from a projector as sound source
U_{TH}	Open circuit voltage at hydrophone, from a transducer as sound source

U_{PT}	Tension en circuit ouvert d'un transducteur, à partir d'un projecteur de source sonore
V	Volume d'eau, volume de la chambre
V_D	Variation de volume
W	Largeur de bande
x	Déplacement du transducteur d'équilibre, amplitude de vibration
Z	Impédance
Z_{eq}	Fonction des impédances de transfert ayant la dimension de l'impédance
Z_{PH}	Impédance électrique de transfert d'un projecteur et d'un hydrophone
Z_{TH}	Impédance électrique de transfert d'un transducteur et d'un hydrophone
Z_{PT}	Impédance électrique de transfert d'un transducteur et d'un projecteur
γ	Rapport des chaleurs spécifiques
θ	Angle vertical
λ	Longueur d'onde du son dans l'eau
λ_f	Longueur d'onde du son dans un fluide
v	Vitesse de rotation
ρ	Densité de l'eau
ρ_f	Densité du fluide
σ	Coefficient de Poisson
τ	Durée de l'impulsion
φ	Angle d'azimut
ω	Fréquence angulaire = $2\pi f$
S_T	Réponse à l'émission en courant d'un transducteur dans une chambre de petites dimensions

5 Procédures d'étalonnage

5.1 Principes

a) Etalonnage sans transducteur étalon

1) Etalonnage par réciprocité:

L'étalonnage est fondé sur le principe de réciprocité, dans lequel au moins un transducteur est un transducteur réciproque.

2) Etalonnage par grandeur physique:

La pression acoustique appliquée à l'hydrophone est calculée à partir de la mesure de grandeurs physiques, telles que déplacement, vitesse ou accélération, élasticité du milieu, etc. (par exemple: transducteur d'équilibre, pistonphone, colonne vibrante, etc.).

b) Etalonnage à l'aide d'un transducteur étalon:

Un hydrophone ou un projecteur est étalonné par comparaison à un transducteur étalon connu.

NOTE Dans ce dernier cas, le projecteur ainsi étalonné peut servir à l'étalonnage d'un autre hydrophone.

U_{PT}	Open circuit voltage at transducer, from a projector as sound source
V	Water volume, chamber volume
V_D	Volume displacement
W	Bandwidth
x	Displacement of null transducer, vibration amplitude
Z	Impedance
Z_{eq}	A function of transfer impedances having the dimension of impedance
Z_{PH}	Electrical transfer impedance of projector and hydrophone
Z_{TH}	Electrical transfer impedance of transducer and hydrophone
Z_{PT}	Electrical transfer impedance of transducer and projector
γ	Ratio of specific heats
θ	Vertical angle
λ	Wavelength of sound in water
λ_f	Wavelength of sound in a fluid
v	Rotational velocity
ρ	Density of water
ρ_f	Density of fluid
σ	Poisson's modulus
τ	Pulse duration
φ	Azimuth angle
ω	Angular frequency = $2\pi f$
S_T	Small chamber transmitting response to current of a transducer

5 Procedures for calibrations

5.1 Principles

a) Calibration without a standard transducer

1) Reciprocity calibration:

Calibration is based upon the reciprocity principle, in which at least one transducer is a reciprocal transducer.

2) Physical calibration:

The sound pressure at the hydrophone is calculated from the measurement of physical parameters such as displacement, velocity or acceleration, medium compliance, etc. (e.g.: null transducer, pistonphone, vibrating column, etc.).

b) Calibration with a standard transducer:

A hydrophone or a projector is calibrated by comparison with a calibrated standard transducer.

NOTE In the latter case, the calibrated projector can be used to calibrate another hydrophone.

5.2 Limites de champ

L'étalonnage doit être effectué par l'une des méthodes suivantes:

- a) Etalonnage en champ libre, conformément aux Articles 8 ou 9.

NOTE Les limites du champ acoustique sont telles que l'étalonnage est possible dans les conditions de champ libre (voir 3.13).

- b) Etalonnage dans une chambre de petites dimensions, conformément aux Articles 10, 11, 12 ou 13.

NOTE Dans ce cas, le champ acoustique est limité à un petit espace dont la plus grande dimension est suffisamment faible par rapport à une longueur d'onde du son (voir 11.4 et 11.5).

5.3 Choix schématique des procédés

L'étalonnage doit être effectué par l'une des méthodes suivantes, en fonction des différents principes et des conditions restrictives dans le champ acoustique et dans la bande de fréquences.

- a) Etalonnage en champ libre par réciprocité, conformément à l'Article 8 pour l'étalonnage sans transducteur étalon en champ libre, entre 1 kHz et 1 MHz.
- b) Etalonnage en champ libre par comparaison, conformément à l'Article 9 pour l'étalonnage avec un transducteur étalon en champ libre, entre 10 Hz et 1 MHz.
- c) Etalonnage par excitation hydrostatique, conformément à l'Article 10 pour l'étalonnage par grandeur physique sans transducteur étalon dans une chambre de petites dimensions, entre 0,01 Hz et 2 Hz.
- d) Etalonnage par compensation piézo-électrique, conformément à l'Article 11 pour l'étalonnage par grandeur physique sans transducteur étalon dans une chambre fermée de petites dimensions, entre 1,0 Hz et 5 kHz.
- e) Etalonnage par réciprocité du coupleur acoustique, conformément à l'Article 12 pour l'étalonnage sans transducteur étalon dans une chambre fermée de petites dimensions, entre 0,1 Hz et 5 kHz.
- f) Etalonnage avec un pistonphone, conformément à l'Article 13 pour l'étalonnage par grandeur physique avec et sans transducteur étalon dans une chambre de petites dimensions, de quelques hertz à plusieurs centaines de hertz.
- g) Etalonnage avec une colonne vibrante, conformément à l'Article 14 pour l'étalonnage par grandeur physique sans transducteur étalon dans une chambre de petites dimensions, entre 10 Hz et 1 kHz.

5.4 Compte-rendu des résultats

Tout étalonnage n'est valable qu'à la date de l'étalonnage et pour les conditions d'environnement présentes au cours de l'étalonnage. Lorsque le résultat de l'étalonnage d'un hydrophone est mentionné, les conditions d'environnement qui se rapportent à cet étalonnage doivent être indiquées, y compris toutes les conditions qui peuvent influencer la sensibilité du dispositif [8], [9], [10], [11] et [12].

NOTE 1 Les conditions à indiquer peuvent comprendre les éléments suivants:

- la date de l'évaluation;
- la température de l'eau;
- la profondeur d'immersion (ou pression hydrostatique appliquée);
- le type de montage ou d'assemblage utilisé;
- la longueur de la durée de trempage et de toute procédure de mouillage adoptée;
- l'orientation du transducteur autour de tout axe ou de la marque d'alignement, et l'indication selon laquelle l'alignement a été effectué manuellement ou acoustiquement;
- la pression acoustique maximale à laquelle est soumis l'hydrophone;
- toutes les hypothèses émises au sujet du dispositif en essai (par exemple la position du centre de référence).

5.2 Field limitations

Calibration shall be carried out by one of the following methods.

- a) Free-field calibration in accordance with Clauses 8 or 9.

NOTE The boundaries of the sound field are such that calibration is possible in free field conditions (see 3.13).

- b) Small chamber calibration in accordance with Clauses 10, 11, 12 or 13.

NOTE In this case, the sound field is restricted within a small space of which the largest dimension is sufficiently less than one wavelength of the sound (see 11.4 and 11.5).

5.3 Schematic survey of procedures

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

- a) Free-field reciprocity calibration in accordance with Clause 8 for calibration without a standard transducer in a free field, between 1 kHz and 1 MHz.
- b) Free-field calibration by comparison in accordance with Clause 9 for calibration with a standard transducer in a free field, between 10 Hz and 1 MHz.
- c) Calibration by hydrostatic excitation in accordance with Clause 10 for physical calibration without a standard transducer in a small chamber, between 0,01 Hz and 2 Hz.
- d) Calibration by piezoelectric compensation in accordance with Clause 11 for physical calibration without a standard transducer in a small closed chamber, between 1,0 Hz and 5 kHz.
- e) Acoustical coupler reciprocity calibration in accordance with Clause 12 for calibration without a standard transducer in a small closed chamber, between 0,1 Hz and 5 kHz.
- f) Calibration with a pistonphone in accordance with Clause 13 for physical calibration with and without a standard transducer in a small chamber, from a few hertz to several hundred hertz.
- g) Calibration with a vibrating column in accordance with Clause 14 for physical calibration without a standard transducer in a small chamber, between 10 Hz and 1 kHz.

5.4 Reporting of results

Any calibration is only valid on the date of calibration and for the environmental conditions which existed during the calibration. When the result of the calibration of a hydrophone is reported, the environmental conditions that pertain to that calibration shall be stated, including all those conditions that may influence the sensitivity of the device [8], [9], [10], [11] and [12].

NOTE 1 Conditions to be reported may include:

- date of the evaluation;
- water temperature;
- depth of immersion (or applied hydrostatic pressure);
- type of mount or rigging used;
- length of soaking time and any wetting procedure adopted;
- orientation of the transducer about any axis or alignment mark and whether the alignment was done manually or acoustically;
- maximum acoustic pressure experienced by the hydrophone;
- any assumptions made about the device under test (e.g., the position of the reference centre).

NOTE 2 Si un hydrophone étalonné est utilisé dans un environnement sensiblement différent de celui qui était présent au cours de l'étalonnage, il peut être nécessaire pour l'utilisateur d'augmenter son évaluation des incertitudes de mesure, pour prendre en compte la modification de l'environnement.

5.5 Périodes de réétalonnage

Les hydrophones de référence utilisés pour les mesures absolues doivent être étalonnés périodiquement, afin de maintenir un statut d'étalonnage valable. Une période appropriée entre les étalonnages doit être choisie après avoir pris en compte l'utilisation qui est faite de l'hydrophone et la probabilité de détérioration du dispositif.

NOTE Pour les hydrophones de référence, qui sont purement utilisés pour l'étalonnage, un réétalonnage annuel peut être approprié (voir CEI 60866). Lorsque les hydrophones sont utilisés sur le terrain et qu'ils peuvent être soumis à un usage abusif, des étalonnages peuvent être nécessaires à des intervalles plus rapprochés.

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

NOTE Les propriétés électroacoustiques des transducteurs ont tendance à varier avec la température ambiante et avec la pression hydrostatique (profondeur) [9], [10].

Lorsque la sensibilité d'un transducteur est requise pour des conditions spécifiques de température de l'eau et de pression hydrostatique (profondeur de l'eau), le transducteur doit:

- être étalonné dans les mêmes conditions de température et de pression dans lesquelles il sera utilisé, ou
- des corrections doivent être apportées à la sensibilité du transducteur et aux valeurs de réponse, d'après les étalonnages antérieurs ou les modèles analytiques validés.

6 Préparation des transducteurs

6.1 Mouillage

Afin de s'assurer que le transducteur est correctement mouillé par l'eau, sans qu'apparaissent un film d'air ou des bulles à sa surface, un produit mouillant doit être appliqué sur la surface entière du transducteur. Après immersion, on ne doit remarquer aucune partie sèche quand on ressort le transducteur de l'eau [11].

6.2 Support de l'hydrophone

Le support d'un hydrophone doit être choisi pour provoquer une influence minimale sur la sensibilité mesurée. Si le montage influence la sensibilité mesurée, l'hydrophone doit être étalonné dans le même montage que celui qui sera utilisé pour les mesures effectuées avec l'hydrophone sur le terrain. Lorsque l'hydrophone est considéré comme sensible au type de support/montage, une description du dispositif de montage doit être mentionnée avec les résultats.

NOTE 1 Certains hydrophones sont plus sensibles que d'autres à l'influence de la méthode de montage.

NOTE 2 Il convient également de veiller à réduire la quantité de bruit transmis par la structure et pouvant être recueilli.

6.3 Influence du câble

S'il est nécessaire, pour les besoins de l'étalonnage, de rallonger le câble de liaison de l'hydrophone, l'impédance électrique du câble prolongateur doit alors être mesurée séparément afin de calculer l'influence de la charge électrique.

NOTE Une description de la manière de prendre en compte l'influence de la charge électrique est donnée en Annexe B. Voir aussi 7.3.

NOTE 2 If use is made of a calibrated hydrophone in an environment significantly different then that which existed during calibration, the user may need to increase his assessment of measurement uncertainties to account for the change in environment.

5.5 Recalibration periods

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

NOTE For reference hydrophones, which are used purely for calibration purposes, an annual recalibration calibration may be appropriate (see IEC 60866). Where hydrophones are used in the field and potentially may be subjected to abuse, calibrations may be required at shorter intervals.

5.6 Temperature and pressure considerations for calibration

NOTE 1 The electroacoustic properties of transducers tend to vary with both ambient temperature and hydrostatic pressure (depth) [9], [10].

Where the sensitivity of a transducer is required for specific conditions of water temperature and hydrostatic pressure (water depth), the transducer shall either:

- a) be calibrated under the same conditions of temperature and pressure that it will be used; or
- b) corrections to transducer sensitivity and response values shall be made based on earlier calibrations or validated analytical models

6 Preparation of transducers

6.1 Wetting

To make sure that the transducer is wetted properly by the water without trapping an air film or bubbles on its surface, a wetting agent shall be applied to the whole transducer surface. No dry patches shall be visible on the transducer when it is immersed and then removed from the water [11].

6.2 Hydrophone support

The supporting mount for a hydrophone shall be chosen to cause minimal influence on the measured sensitivity. If the mount influences the measured sensitivity, the hydrophone shall be calibrated in the same mount that will be used for measurements made with the hydrophone in the field. Where the hydrophone is thought to be sensitive to the type of support/mount, a description of the mounting arrangement shall be stated with the results.

NOTE 1 Some hydrophones are more susceptible than others to the influence of the method of mounting.

NOTE 2 Care should also be taken to minimize the amount of structure borne noise which may be picked up.

6.3 Influence of cable

If the cable to the hydrophone needs to be lengthened for the purposes of the calibration, then the electrical impedance of the extension cable shall be measured separately in order to calculate the influence of electrical loading.

NOTE A description of how to account for the influence of electrical loading is given in Annex B. See also 7.3.

7 Mesures électriques

7.1 Forme du signal

Le signal utilisé lors de l'étalonnage doit être sinusoïdal (onde continue) ou à ondes sinusoïdales en impulsion (impulsion sonore déclenchée). Un nombre suffisant de fréquences doit être choisi afin de s'assurer que les performances de l'hydrophone sont bien caractérisées sur la bande de fréquences souhaitée.

7.2 Mise à la terre

Afin d'éviter les boucles de terre, les bornes électriques des transducteurs ne doivent pas être en contact avec l'eau. Les parties métalliques exposées d'un hydrophone doivent être les seules connexions à la terre pour l'écran du câble de l'hydrophone et pour le boîtier de l'amplificateur. Tous les autres contacts à la terre doivent être exclus.

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 mesurée à l'extrémité du câble de l'hydrophone. Les bornes électriques choisies doivent être spécifiées (voir 3.8).

Pour un signal à onde continue, la mesure doit être effectuée à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée. Cependant, pour les signaux d'impulsion sonore, la forme d'onde en tension de l'hydrophone doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre sont utilisés avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure, ces éléments doivent être étalonnés, sauf si le même canal de mesure est également utilisé pour la mesure du courant traversant le projecteur (voir 7.4).

7.3.2 Charge électrique par l'appareil de mesure

Au cours des mesures, l'hydrophone doit être connecté à un appareil de mesure à impédance d'entrée électrique élevée (amplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur), de sorte que l'impédance d'entrée électrique soit bien supérieure à l'impédance électrique de l'hydrophone (idéalement, plus de 100 fois supérieure). Lors de la mesure de l'angle de phase de la tension de sortie de l'hydrophone, l'impédance d'entrée électrique de l'appareil de mesure doit être égale à plus de 1 000 fois l'impédance électrique de l'hydrophone. Lorsque l'impédance électrique de l'hydrophone est élevée (par exemple pour un hydrophone piézo-électrique de petites dimensions et de faible capacité), il faut prendre en compte la charge électrique de l'hydrophone par l'appareil de mesure. Dans ce cas, les corrections de la charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée, afin d'obtenir la tension en circuit ouvert.

NOTE 1 Les corrections peuvent être calculées à l'aide de la procédure donnée à l'Annexe B.

NOTE 2 Si la même charge électrique est utilisée au cours de l'étalonnage pour un hydrophone particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions mesurées individuelles.

7 Electrical measurements

7.1 Signal type

The signal used for the calibration shall be either sinusoidal (continuous wave) 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.

7.2 Earthing

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

7.3 Measurement of hydrophone output voltage

7.3.1 General

The open-circuit voltage of the hydrophone shall be measured at the end of the hydrophone cable. The electrical terminals selected shall be specified (see 3.8).

For a continuous wave signal, the measurement shall be done using a voltmeter of high electrical input impedance. However, for tone-burst signals, the hydrophone voltage waveform shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter are used in combination with the voltmeter or digitizer to form a measuring channel, these elements shall be calibrated, unless the same measuring channel is also used for the measurement of projector current (see 7.4).

7.3.2 Electrical loading by measuring instrument

During the measurements, the hydrophone shall be connected to a high electrical input-impedance measuring instrument (amplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer) such that the electrical input impedance is much larger than the electrical impedance of the hydrophone (ideally, more than 100 times larger). When measuring the phase angle of the hydrophone output voltage, the electrical input impedance of the measuring instrument shall be more than 1 000 times the electrical impedance of the hydrophone. Where the electrical impedance of the hydrophone is high (for example for a small piezoelectric hydrophone of low capacitance), consideration shall be given to the electrical loading of the hydrophone by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage.

NOTE 1 The corrections may be calculated using the procedure given in Annex B.

NOTE 2 If the same electrical load is used throughout the calibration for a particular hydrophone, the corrections may be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

7.3.3 Charge électrique par les câbles prolongateurs

Si un câble prolongateur est relié à l'hydrophone, ce câble appliquera une charge électrique sur l'hydrophone, et des corrections doivent être appliquées afin d'obtenir la tension en circuit ouvert à l'extrémité du câble de l'hydrophone. Lorsque le câble et l'hydrophone semblent être purement des capacités d'un point de vue électrique (ceci est généralement vrai pour un câble et est vrai pour un hydrophone dans la bande de fréquences bien en dessous de la résonance), une correction doit être déduite des capacités de l'hydrophone et du câble. Lorsque l'impédance électrique de l'hydrophone n'est pas purement une capacité, par exemple à des fréquences proches de la résonance, l'impédance électrique complexe doit être utilisée pour calculer la correction de charge.

NOTE 1 Des lignes directrices sur les deux cas ci-dessus sont données en Annexe B.

NOTE 2 Si le même câble prolongateur est utilisé au cours de l'étalonnage pour un hydrophone particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux tensions mesurées individuelles.

7.3.4 Bruit

Le rapport signal sur bruit doit être suffisant, de sorte que les mesures puissent être effectuées sans perte significative de précision, voir la CEI 60500, [1], [13].

NOTE 1 Le niveau de bruit électrique peut dégrader la précision lors de la réalisation de mesures électriques.

NOTE 2 Il convient que l'amplitude du signal soit au moins supérieure de 20 dB au niveau de bruit.

NOTE 3 Le niveau de bruit parasite à large bande peut être réduit par l'utilisation d'un filtre passe-bande suffisamment large pour laisser passer le signal sans déformation.

NOTE 4 En présence de bruit électrique, le rapport signal sur bruit peut être amélioré en faisant la moyenne des signaux répétés. Pour le bruit aléatoire, le moyennage de N signaux améliorera le rapport signal sur bruit d'un facteur de la racine carrée de N .

7.3.5 Diaphonie et interférences acoustiques

En présence d'interférences et de diaphonie, le moyennage des signaux et le filtrage à bande étroite n'entraîneront pas en général une amélioration de la précision. Par conséquent, des efforts doivent être entrepris pour déterminer la cause du problème et des mesures doivent être prises pour réduire les effets. Le niveau d'interférence acoustique doit être au moins inférieur de 30 dB au niveau du signal.

Lorsque la diaphonie est présente avec des signaux d'impulsion sonore, des précautions doivent être prises si la longueur de la salve est supérieure au temps de propagation acoustique.

Dans le cas d'un signal à onde continue, le niveau de diaphonie doit être au moins inférieur de 40 dB au niveau du signal.

NOTE Voir 8.6.5.

7.3.6 Préamplificateurs intégrés

Lorsqu'un hydrophone possède un préamplificateur intégré, la sensibilité doit être exprimée comme la sensibilité d'extrémité de câble (y compris la performance du préamplificateur).

NOTE Lorsqu'un hydrophone possède un préamplificateur intégré, les corrections de la charge électrique par les câbles prolongateurs ou les appareils de mesure sont inutiles.

7.4 Mesure du courant traversant le projecteur

Le courant traversant le projecteur doit être déterminé par un transformateur de courant étalonné (produisant une tension proportionnelle au courant d'attaque), ou en mesurant la chute de tension à travers une petite résistance étalonnée (valeur de quelques ohms uniquement) en série avec le projecteur.

NOTE La première méthode est la méthode préférentielle.

7.3.3 Electrical loading by extension cables

If 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 shall be derived from the capacitances of the hydrophone and cable. Where the electrical impedance of the hydrophone is not purely capacitance for example, at frequencies close to resonance, the complex electrical impedance shall be used to calculate the loading correction.

NOTE 1 Guidance on both the above cases is given in Annex B.

NOTE 2 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.

7.3.4 Noise

The signal to noise ratio shall be sufficient that the measurements may be made without significant loss of accuracy, see IEC 60500, [1], [13].

NOTE 1 The level of electrical noise may degrade the accuracy when making electrical measurements.

NOTE 2 The signal amplitude should be at least 20 dB greater than the noise level.

NOTE 3 The level of broad-band 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 4 In the presence of electrical noise, the signal to noise ratio may be improved by averaging of repeated signals. For random noise, averaging N signals will improve the signal to noise ratio by a factor of square root of N .

7.3.5 Cross-talk and acoustic interference

In the presence of interference and cross-talk, signal averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement in accuracy. Therefore, efforts shall be made to determine the cause of the problem and steps taken to minimize the effects. 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 shall be taken if the length of the burst is greater than the acoustic propagation delay.

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

NOTE See 8.6.5.

7.3.6 Integral preamplifiers

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

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

7.4 Measurement of projector current

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

NOTE The first method is the preferred method.

7.5 Mesure de l'impédance de transfert

L'impédance électrique de transfert entre un projecteur et un hydrophone doit être calculée à partir des valeurs complexes mesurées du courant traversant le projecteur et de la tension de l'hydrophone.

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

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

NOTE 2 Si cela est nécessaire, un atténuateur étalonné peut être utilisé pour égaliser la tension représentant le courant traversant le projecteur avec la tension de l'hydrophone. Ceci réduira les erreurs dues à la non-linéarité dans le canal de mesure.

NOTE 3 Dans la mesure où cette impédance dépend des conditions de champ et des conditions de charge électrique du projecteur et de l'hydrophone, ces conditions, ainsi que les bornes électriques où la tension et le courant sont mesurés, sont spécifiées. Si l'hydrophone est placé dans le champ lointain du projecteur, l'impédance de transfert est inversement proportionnelle à la distance d entre les centres de référence du projecteur et de l'hydrophone:

$$Z_{PH} d = \text{constante} \quad (2)$$

8 Etalonnage en champ libre par réciprocité

8.1 Principe général

Pour les étalonnages avec l'incertitude la plus faible pouvant être obtenue, l'étalonnage primaire des hydrophones dans les conditions de champ libre (voir 3.13) est entrepris en utilisant une méthode basée sur le principe de réciprocité. La bande de fréquences de l'étalonnage est généralement restreinte aux fréquences comprises entre 1 kHz et 1 MHz [1], [2], [12], [14] à [51], voir la CEI 60866 et la CEI 60500.

Au moins trois transducteurs doivent être utilisés pour la méthode d'étalonnage, dont au moins un doit être réciproque.

Deux des transducteurs doivent être immergés en champ libre, séparés par une distance connue d , loin des limites du volume d'eau, avec leurs axes dirigés l'un vers l'autre.

En utilisant l'un comme projecteur et l'autre comme hydrophone, l'impédance électrique de transfert doit être déterminée à différentes fréquences situées dans la bande de fréquences concernée (voir 7.5).

Avec au moins trois couples, résultant de la combinaison d'au moins trois transducteurs, au moins trois impédances électriques de transfert indépendantes doivent être obtenues. A partir de ces grandeurs, la sensibilité en champ libre de l'hydrophone à étalonner et de tous les transducteurs réciproques, ainsi que la réponse à l'émission en courant de chaque projecteur et de tous les transducteurs réciproques, doit être calculée à chaque fréquence, obtenant ainsi les courbes de réponse en fréquence requises des transducteurs utilisés.

NOTE Avec un réflecteur acoustique parfait, comme la surface de l'eau, un étalonnage par réciprocité peut être effectué avec un seul transducteur réciproque.

7.5 Measurement of transfer impedance

The electrical transfer impedance between a projector and a hydrophone shall be calculated from the measured complex values of the projector current and hydrophone voltage.

For highest accuracy, the current shall be measured through the same measuring channel as the hydrophone voltage (the measuring channel may consist of an amplifier, filter, digitizer, etc.).

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

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

NOTE 3 Because this impedance depends on the field conditions and the electrical load conditions of the projector and the hydrophone, these conditions as well as the electrical terminals where the voltage and the current are measured, are specified. If the hydrophone is placed in the far field of the projector, the transfer impedance is inversely proportional to the distance d between the reference centres of the projector and the hydrophone:

$$Z_{PH} d = \text{constant} \quad (2)$$

8 Free-field reciprocity calibration

8.1 General principle

For calibrations with the smallest obtainable uncertainty, the primary calibration of hydrophones in free-field conditions (see 3.13) is undertaken using a method based on the principle of reciprocity. The frequency range of calibration is generally restricted to frequencies between 1 kHz and 1 MHz [1], [2], [12], [14] to [51], see IEC 60866, IEC 60500.

At least three transducers shall be used for the calibration technique, of which at least one shall be reciprocal.

Two of the transducers shall be placed under water in free-field conditions separated at a known distance d , far from the limits of the water volume with their axes directed towards each other.

Using one of them as a projector and the other as a hydrophone, the electrical transfer impedance shall be determined at a number of frequencies throughout the frequency range of interest (see 7.5).

With at least three pairs, formed with at least three transducers, at least three independent electrical transfer impedances shall be obtained. From these quantities, the free-field sensitivity of the hydrophone to be calibrated and all reciprocal transducers, as well as the transmitting response to current of each projector and all reciprocal transducers shall be calculated at each frequency, yielding the required frequency response curves of the transducers involved.

NOTE With a perfect sound reflector, such as the water surface, a reciprocity calibration is possible with only one reciprocal transducer.

8.2 Théorie

8.2.1 Etalonnage sans phase

NOTE Le principe de réciprocité établit que, pour tout transducteur réciproque, le rapport de la sensibilité en champ libre à la réponse à l'émission en courant est égal à une valeur donnée, dite paramètre de réciprocité en champ libre. Si le quotient et le produit de deux grandeurs sont connus, on peut déduire les valeurs de ces grandeurs.

Le produit de la sensibilité en champ libre et de la réponse à l'émission en courant doit être mesuré par la méthode d'étalonnage par réciprocité en champ libre, en utilisant un projecteur, un hydrophone et un transducteur réciproque.

Soit I_p le courant traversant le projecteur P ayant une réponse à l'émission en courant égale à S_p . A une distance d de son centre de référence et dans la direction de référence spécifiée dans la définition de S_p , le projecteur génère une pression acoustique p qui doit être calculée par:

$$p = \frac{S_p I_p}{d} \quad (3)$$

en supposant que la répartition de l'énergie sonore provenant du projecteur est sphérique.

Placer un hydrophone H ayant une sensibilité en champ libre M_H dans ce champ acoustique, de sorte que son centre de référence soit situé à une distance d_1 du centre de référence du projecteur P, produisant une tension en circuit ouvert U_{PH} donnée par:

$$U_{PH} = M_H p = \frac{M_H S_p I_p}{d_1} \quad (4)$$

Le module de l'impédance électrique de transfert $|Z_{PH}|$ de ce couple de transducteurs doit être calculé par:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_p} = \frac{M_H S_p}{d_1} \quad (5)$$

Dans la deuxième étape, déterminer le module de l'impédance électrique de transfert $|Z_{PT}|$ après remplacement de l'hydrophone H par un transducteur réciproque T, par:

$$|Z_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_p} = \frac{M_T S_p}{d_2} \quad (6)$$

Ici, d_2 est la distance entre les centres de référence du transducteur réciproque T et du projecteur P.

8.2 Theory

8.2.1 Calibration without phase

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

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

Let a current I_p flow through a projector P with a transmitting response to current S_p . At a distance d from its reference centre and in the reference direction specified in the definition of S_p , the projector generates a sound pressure p which shall be calculated by:

$$p = \frac{S_p I_p}{d} \quad (3)$$

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

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

$$U_{PH} = M_H p = \frac{M_H S_p I_p}{d_1} \quad (4)$$

The electrical transfer impedance magnitude $|Z_{PH}|$ of this transducer pair shall be calculated by:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_p} = \frac{M_H S_p}{d_1} \quad (5)$$

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

$$|Z_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_p} = \frac{M_T S_p}{d_2} \quad (6)$$

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

Dans la troisième étape, déterminer le module de l'impédance électrique de transfert $|Z_{TH}|$ comme suit:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (7)$$

où d_3 est la distance entre le centre de référence du transducteur réciproque T et l'hydrophone H.

NOTE Dans ce cas, le transducteur T est utilisé comme projecteur et H à nouveau comme hydrophone.

On peut alors montrer aisément que:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (8)$$

La distance entre le projecteur et l'hydrophone doit être suffisamment grande pour que l'hydrophone se trouve dans le champ lointain du projecteur (voir 3.12) et que l'hydrophone reçoive une onde quasiment plane (voir aussi 8.3).

Pour un transducteur réciproque, le rapport de la sensibilité en champ libre par la réponse à l'émission en courant devient égal au paramètre de réciprocité d'onde sphérique $2d_0/\rho f$ à la distance de référence de $d_0 = 1$ m :

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \quad (9)$$

où ρ est la densité de l'eau et f est la fréquence.

Puisque le quotient et le produit de la sensibilité en champ libre M et de la réponse à l'émission en courant S du transducteur T sont connus, les valeurs de M et S doivent être calculées à partir des équations (8) et (9), comme suit:

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

$$S_T^2 = \frac{\rho f d_2 d_3}{2d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (11)$$

A l'aide des équations (7) et (11), calculer la sensibilité de l'hydrophone M_H :

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (12)$$

In a third step, determine the electrical transfer impedance magnitude $|Z_{TH}|$ as follows:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (7)$$

where d_3 is the distance between the reference centre of the reciprocal transducer T and the hydrophone H.

NOTE In this case, the transducer T is used as a projector, and H again as a hydrophone.

Now it can easily be shown that:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (8)$$

The distance between the projector and the hydrophone shall be large enough so that the hydrophone is in the far field of the projector (see 3.12) and that the hydrophone receives a substantially plane wave (see also 8.3).

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

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \quad (9)$$

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

As the product and the quotient of the free-field sensitivity M and the transmitting response to current S of the transducer T are known, the values of M and S shall be calculated from equations (8) and (9) as follows:

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

$$S_T^2 = \frac{\rho f d_2 d_3}{2d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (11)$$

Using equations (7) and (11) calculate for the sensitivity of the hydrophone M_H :

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (12)$$

De même, à l'aide des équations (5) et (12), calculer la réponse à l'émission en courant S_p du projecteur P :

$$S_p^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2d_3} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (13)$$

NOTE 1 On obtient une meilleure précision statistique et l'on peut vérifier la réciprocité lorsque plus d'un transducteur est réciproque. Si, par exemple, le projecteur P peut aussi être utilisé comme hydrophone, le module de l'impédance électrique de transfert $|Z_{TP}|$ peut aussi être déterminé. On peut alors montrer par le principe de réciprocité que $|Z_{TP}|$ est égale à $|Z_{PT}|$. Ainsi, $|Z_{PT}|$ peut aussi être obtenue deux fois, une fois en utilisant P comme projecteur et T comme hydrophone et une deuxième fois en utilisant T comme projecteur et P comme hydrophone.

Toute différence entre ces deux valeurs, pour une même fréquence, est le signe d'un défaut de réciprocité ou de linéarité, ou peut provenir d'une erreur de mesure. L'incertitude de la valeur moyenne peut être inférieure à celle de chaque valeur prise séparément.

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

8.2.2 Etalonnage avec phase

L'angle de phase de la sensibilité en champ libre doit également être déterminé en prolongeant les mesures pour inclure la phase.

NOTE 1 L'ensemble des pressions, courants d'entrée, tensions de sortie, impédances électriques de transfert, réponses à l'émission, et sensibilités en champ libre sont à présent complexes; ils incluent à la fois l'amplitude et la phase. Par exemple, l'équation (3) pour la pression produite par le projecteur P au niveau de l'hydrophone H devient:

$$p = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{S_p I_p}{d_1} \quad (14)$$

où la distance d_1 est mesurée entre le centre de référence du projecteur et le centre de référence de l'hydrophone. Le nombre d'ondes $k = 2\pi f/c$, où c est la vitesse du son dans le milieu environnant. La distance de référence d_0 utilisée dans la définition de la réponse à l'émission est égale à 1 m.

L'impédance électrique de transfert complexe Z_{PH} doit être calculée par:

$$Z_{PH} = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{M_H S_p}{d_1} \quad (15)$$

De même, calculer les impédances électriques de transfert Z_{PT} et Z_{TH} comme suit:

$$Z_{PT} = \exp[jk(d_0 - d_2)] \frac{M_T S_p}{d_2} \quad (16)$$

$$Z_{TH} = \exp[jk(d_0 - d_3)] \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (17)$$

Similarly, using equations (5) and (12), calculate the transmitting response to current S_p of the projector P :

$$S_p^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2d_3} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (13)$$

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

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

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

8.2.2 Calibration with phase

The phase angle of the free-field sensitivity shall also be determined by extending the measurements to include phase.

NOTE 1 All of the pressures, input currents, output voltages, electrical transfer impedances, transmitting responses, and free-field sensitivities are now complex; they include both amplitude and phase. For example, equation (3) for the pressure produced by the projector P at the hydrophone H becomes:

$$p = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{S_p I_p}{d_1} \quad (14)$$

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

The complex electrical transfer impedance Z_{PH} shall be calculated by:

$$Z_{PH} = \exp[jk(d_0 - d_1)] \frac{M_H S_p}{d_1} \quad (15)$$

Similarly calculate the electrical transfer impedances Z_{PT} and Z_{TH} as follows:

$$Z_{PT} = \exp[jk(d_0 - d_2)] \frac{M_T S_p}{d_2} \quad (16)$$

$$Z_{TH} = \exp[jk(d_0 - d_3)] \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (17)$$

où d_2 est la distance entre les centres de référence de P et T et d_3 est la distance entre les centres de référence de T et H.

Les équations (15) à (17) doivent être combinées pour fournir l'équivalent complexe de l'équation (8):

$$\frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} = \exp[jk(d_0 + d_1 - d_2 - d_3)] \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (18)$$

A l'aide du paramètre de réciprocité d'onde sphérique complexe, calculer à la place de l'équation (9):

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{j \rho f} \exp(jk d_0) \quad (19)$$

Les expressions correspondant à (10) et (11) doivent être obtenues en combinant les équations (18) et (19):

$$M_T^2 = \frac{2d_2 d_3}{j \rho f d_1} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1)] \left[\frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \right] \quad (20)$$

$$S_T^2 = \frac{j \rho f d_2 d_3}{2d_1} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0)] \frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \quad (21)$$

Les équations (17) et (21) doivent être utilisées pour déduire l'expression suivante pour la sensibilité en champ libre complexe de l'hydrophone H.

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{j \rho f d_2} \exp[jk(d_1 + d_3 - d_2)] \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (22)$$

De même, l'expression pour la réponse à l'émission S_p correspondant à (13) doit être calculée par:

$$S_p^2 = \frac{j \rho f d_1 d_2}{2d_3} \exp[jk(d_1 + d_2 - d_3 - 2d_0)] \frac{Z_{PH} Z_{PT}}{Z_{TH}} \quad (23)$$

NOTE 2 La difficulté liée à la détermination de la phase de M_H par cette méthode réside dans la détermination précise de la vitesse du son et des distances de mesure d_1 , d_2 et d_3 . Par exemple, à 100 kHz dans l'eau, une erreur de 1,0 mm seulement dans une distance quelconque donne une erreur de phase d'environ 12°.

Afin d'éviter ceci, positionner les trois transducteurs P, H et T sur une ligne droite avec H situé entre P et T, puis $d_2 = d_1 + d_3$. Simplifier ensuite l'équation (22) comme suit:

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{j \rho f d_2} \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (24)$$

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

Equations (15) to (17) shall be combined to produce the complex equivalent of equation (8):

$$\frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} = \exp[jk(d_0 + d_1 - d_2 - d_3)] \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (18)$$

Using the complex spherical wave reciprocity parameter calculate, instead of equation (9):

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{j \rho f} \exp(jk d_0) \quad (19)$$

Expressions corresponding to (10) and (11) shall be obtained by combining equations (18) and (19):

$$M_T^2 = \frac{2d_2 d_3}{j \rho f d_1} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1)] \frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \quad (20)$$

$$S_T^2 = \frac{j \rho f d_2 d_3}{2d_1} \exp[jk(d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0)] \frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \quad (21)$$

Equations (17) and (21) shall be used to derive the following expression for the complex free-field sensitivity of the hydrophone H.

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{j \rho f d_2} \exp[jk(d_1 + d_3 - d_2)] \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (22)$$

Similarly, the expression for the transmitting response S_p corresponding to (13) shall be calculated by:

$$S_p^2 = \frac{j \rho f d_1 d_2}{2d_3} \exp[jk(d_1 + d_2 - d_3 - 2d_0)] \frac{Z_{PH} Z_{PT}}{Z_{TH}} \quad (23)$$

NOTE 2 The difficulty of determining the phase of M_H by this method lies in accurately determining both the sound speed and the measurement distances d_1 , d_2 and d_3 . For example, at 100 kHz in water, an error of only 1,0 mm in any one of the distances gives a phase error of about 12°.

To avoid this, position the three transducers P, H, and T in a straight line with H located between P and T, then $d_2 = d_1 + d_3$. Then simplify equation (22) to:

$$M_H^2 = \frac{2d_1 d_3}{j \rho f d_2} \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (24)$$

NOTE 3 Etant donné que les distances et la vitesse du son n'apparaissent pas explicitement dans un terme de phase dans l'équation (24), la précision de la phase calculée de M_H est uniquement limitée par la précision des mesures de phase des tensions et des courants et par le positionnement. Un cadre de mesure particulier pouvant réduire les erreurs de positionnement est illustré à la Figure 2.

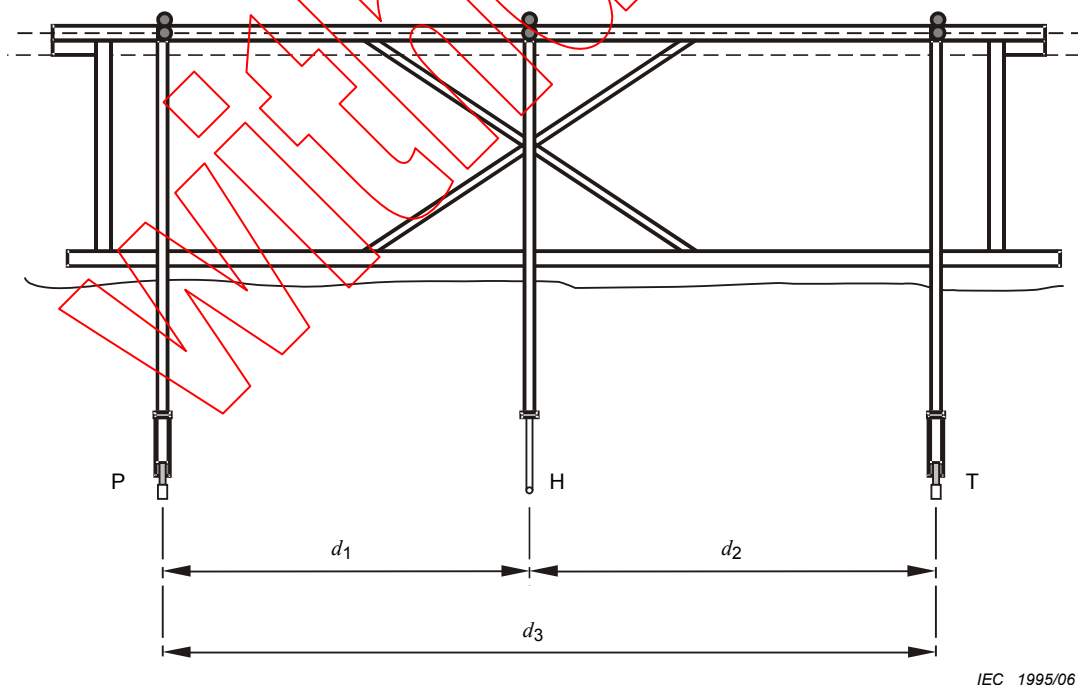
Les mesures doivent être effectuées comme suit:

- Monter les transducteurs comme représenté à la Figure 2 avec leurs centres de référence séparés par les distances d_1 , d_2 et d_3 , où $d_3 = d_2 - d_1$. Aligner leurs directions de référence sur P, dirigé vers H et T. Déterminer l'impédance électrique de transfert complexe Z_{PH} à partir du courant d'entrée vers P et de la tension de sortie provenant de H.
- Enlever l'hydrophone avec son crochet du cadre. Déterminer l'impédance électrique de transfert complexe Z_{PT} à partir du courant d'entrée vers P et de la tension de sortie provenant de T.
- Replacer l'hydrophone avec son crochet dans le cadre et tourner autour de son centre de référence, de sorte que T soit à présent dirigé vers H et que la distance d_3 soit maintenue entre les centres de référence de H et T. Déterminer l'impédance électrique de transfert complexe Z_{TH} à partir du courant d'entrée vers T et de la tension de sortie provenant de H.

Calculer le module et l'angle de phase de la sensibilité en champ libre de l'hydrophone à partir de l'équation (24) à l'aide des impédances électriques de transfert mesurées [23].

NOTE 3 La sensibilité résultante est représentative à la fois de l'hydrophone et de son crochet.

NOTE 4 Il convient d'effectuer l'étalonnage en utilisant le même crochet qui soutiendra l'hydrophone lorsqu'il est utilisé pour les mesures de champs. (Voir 6.2)



IEC 1995/06

Figure 2 – Cadre de mesure pour soutenir les trois transducteurs en ligne: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner