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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

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 réciprocité 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 77

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 $\times$ 6 m $\times$ 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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 $\times$ 6 m $\times$ 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ACOUSTIQUE SOUS-MARINE – HYDROPHONES – ETALONNAGE 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;

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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;

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– 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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– 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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

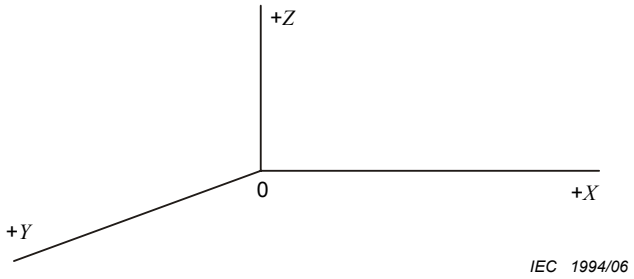


Figure 1 – Système de coordonnées dans le sens des aiguilles d'une montre

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

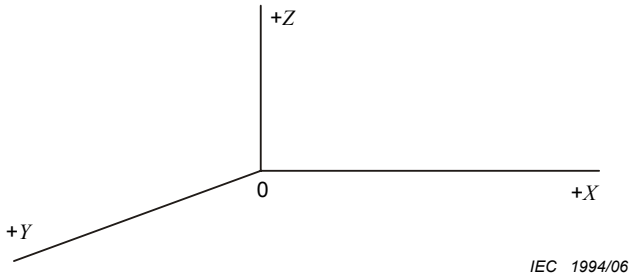


Figure 1 – Left-hand co-ordinate system

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

NOTE 1 $$Z_{\mathrm{PH}} = \frac{U_{\mathrm{H}}}{I_{\mathrm{P}}} \qquad (1)$$

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 $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ fois un terme de phase $\exp\left(j\varphi\right)$, 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

NOTE 1 $$Z_{\mathrm{PH}} = \frac{U_{\mathrm{H}}}{I_{\mathrm{P}}} \qquad (1)$$

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 $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ times a phase term $\exp\left(j\varphi\right)$, 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 V·µPa^{-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, V·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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 V·μPa^{-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, V·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 expended 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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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, $\mathrm{V \cdot Pa^{-1}}$

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 $1\ \mu\mathrm{Pa \cdot m \cdot A^{-1}}$.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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, $\mathrm{V \cdot Pa^{-1}}$

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 $\mu\mathrm{Pa \cdot m \cdot A^{-1}}$.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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, $Pa \cdot m \cdot A^{-1}$.

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, $Pa \cdot m \cdot V^{-1}$.

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 $S_{V,\,\mathrm{ref}}$

NOTE 1 Unité: décibel, dB.

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

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, $Pa \cdot A^{-1}$.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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, $Pa \cdot m \cdot A^{-1}$.

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, $Pa \cdot m \cdot V^{-1}$.

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 $S_{V,\mathrm{ref}}$

NOTE 1 The unit is the decibel, dB.

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

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, $Pa \cdot A^{-1}$.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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
$\mathrm{d}S$	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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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
$\mathrm{d}S$	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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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	Epaisseur 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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

ν 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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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
ν	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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

a) être étalonné dans les mêmes conditions de température et de pression dans lesquelles il sera utilisé, ou

b) 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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

$$Z_{\mathrm{PH}}\, d = \text{constante} \tag{2}$$

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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

$$Z_{\mathrm{PH}}\, d = \mathrm{constant} \tag{2}$$

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.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

$$p = \frac{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d} \tag{3}$$

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:

$$U_{\mathrm{PH}} = M_{\mathrm{H}} p = \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{4}$$

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

$$\left|Z_{\mathrm{PH}}\right| = \frac{U_{\mathrm{PH}}}{I_{\mathrm{P}}} = \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{5}$$

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

$$\left|Z_{\mathrm{PT}}\right| = \frac{U_{\mathrm{PT}}}{I_{\mathrm{P}}} = \frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{P}}}{d_2} \tag{6}$$

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

$$p = \frac{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d} \tag{3}$$

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:

$$U_{\mathrm{PH}} = M_{\mathrm{H}} p = \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{4}$$

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

$$\left|Z_{\mathrm{PH}}\right| = \frac{U_{\mathrm{PH}}}{I_{\mathrm{P}}} = \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{5}$$

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

$$\left|Z_{\mathrm{PT}}\right| = \frac{U_{\mathrm{PT}}}{I_{\mathrm{P}}} = \frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{P}}}{d_2} \tag{6}$$

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$|Z_{\mathrm{TH}}| = \frac{U_{\mathrm{TH}}}{I_{\mathrm{T}}} = \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{T}}}{d_3} \tag{7}$$

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:

$$\frac{|Z_{\mathrm{PT}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PH}}|} = \frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{T}} d_1}{d_2 d_3} \tag{8}$$

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 $d_0 = 1\ \mathrm{m}$:

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{S_{\mathrm{T}}} = \frac{2}{\rho f} \tag{9}$$

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:

$$M_{\mathrm{T}}^2 = \frac{2 d_2 d_3}{\rho f d_1} \frac{|Z_{\mathrm{PT}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PH}}|} \tag{10}$$

$$S_{\mathrm{T}}^2 = \frac{\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{|Z_{\mathrm{PT}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PH}}|} \tag{11}$$

A l'aide des équations (7) et (11), calculer la sensibilité de l'hydrophone M_{H}:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \frac{2 d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{\mathrm{PH}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PT}}|} \tag{12}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{M_H S_T}{d_3} \tag{7}$$

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:

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

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 $d_0 = 1\,\mathrm{m}$:

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \tag{9}$$

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:

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

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

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

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$S_{\mathrm{P}}^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|}{\left|Z_{\mathrm{TH}}\right|} \tag{13}$$

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 $\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|$ peut aussi être déterminé. On peut alors montrer par le principe de réciprocité que $\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|$ est égale à $\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|$. Ainsi, $\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|$ 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:

$$p = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_1\right)\right] \frac{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{14}$$

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:

$$Z_{\mathrm{PH}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_1\right)\right] \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{15}$$

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

$$Z_{\mathrm{PT}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_2\right)\right] \frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{P}}}{d_2} \tag{16}$$

$$Z_{\mathrm{TH}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_3\right)\right] \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{T}}}{d_3} \tag{17}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$S_{\mathrm{P}}^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|}{\left|Z_{\mathrm{TH}}\right|} \tag{13}$$

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 $\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|$ can also be determined. Now it can be shown by the principle of reciprocity that $\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|$ is equal to $\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|$. Thus, $\left|Z_{\mathrm{PT}}\right|$ 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:

$$p = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_1\right)\right] \frac{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{14}$$

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:

$$Z_{\mathrm{PH}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_1\right)\right] \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{P}}}{d_1} \tag{15}$$

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

$$Z_{\mathrm{PT}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_2\right)\right] \frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{P}}}{d_2} \tag{16}$$

$$Z_{\mathrm{TH}} = \exp\left[\, jk\left(d_0 - d_3\right)\right] \frac{M_{\mathrm{H}} S_{\mathrm{T}}}{d_3} \tag{17}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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):

$$\frac{Z_{\mathrm{PT}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PH}}} = exp\left[jk\left(d_0 + d_1 - d_2 - d_3\right)\right]\frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{T}} d_1}{d_2 d_3} \tag{18}$$

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

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{S_{\mathrm{T}}} = \frac{2}{j\,\rho\, f}\exp\left(j\,k\,d_0\right) \tag{19}$$

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

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

$$S_{\mathrm{T}}^2 = \frac{j\,\rho\, f d_2 d_3}{2d_1}\exp\left[jk\left(d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PT}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PH}}} \tag{21}$$

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

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \frac{2d_1 d_3}{j\,\rho\, f d_2}\exp\left[jk\left(d_1 + d_3 - d_2\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PT}}} \tag{22}$$

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

$$S_{\mathrm{P}}^2 = \frac{j\,\rho\, f\, d_1\, d_2}{2d_3}\exp\left[jk\left(d_1 + d_2 - d_3 - 2\,d_0\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{PT}}}{Z_{\mathrm{TH}}} \tag{23}$$

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:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \frac{2d_1 d_3}{j\,\rho\, f d_2}\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PT}}} \tag{24}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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):

$$\frac{Z_{\mathrm{PT}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PH}}} = exp\left[\, jk\left(d_0 + d_1 - d_2 - d_3\right)\right]\frac{M_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{T}} d_1}{d_2 d_3} \tag{18}$$

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

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{S_{\mathrm{T}}} = \frac{2}{j\,\rho\, f}\exp\left(j\,k\,d_0\right) \tag{19}$$

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

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

$$S_{\mathrm{T}}^2 = \frac{j\,\rho\, f d_2 d_3}{2d_1}\exp\left[\, jk\left(d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PT}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PH}}} \tag{21}$$

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

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \frac{2d_1 d_3}{j\,\rho\, f d_2}\exp\left[\, jk\left(d_1 + d_3 - d_2\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PT}}} \tag{22}$$

Similarly, the expression for the transmitting response S_{P} corresponding to (13) shall be calculated by:

$$S_{\mathrm{P}}^2 = \frac{j\,\rho\, f\, d_1\, d_2}{2d_3}\exp\left[\, jk\left(d_1 + d_2 - d_3 - 2\,d_0\right)\right]\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{PT}}}{Z_{\mathrm{TH}}} \tag{23}$$

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 $\mathrm{P}, \mathrm{H},$ 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:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \frac{2d_1 d_3}{j\,\rho\, f d_2}\frac{Z_{\mathrm{PH}}\, Z_{\mathrm{TH}}}{Z_{\mathrm{PT}}} \tag{24}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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:

a) 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.

b) 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.

c) 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)

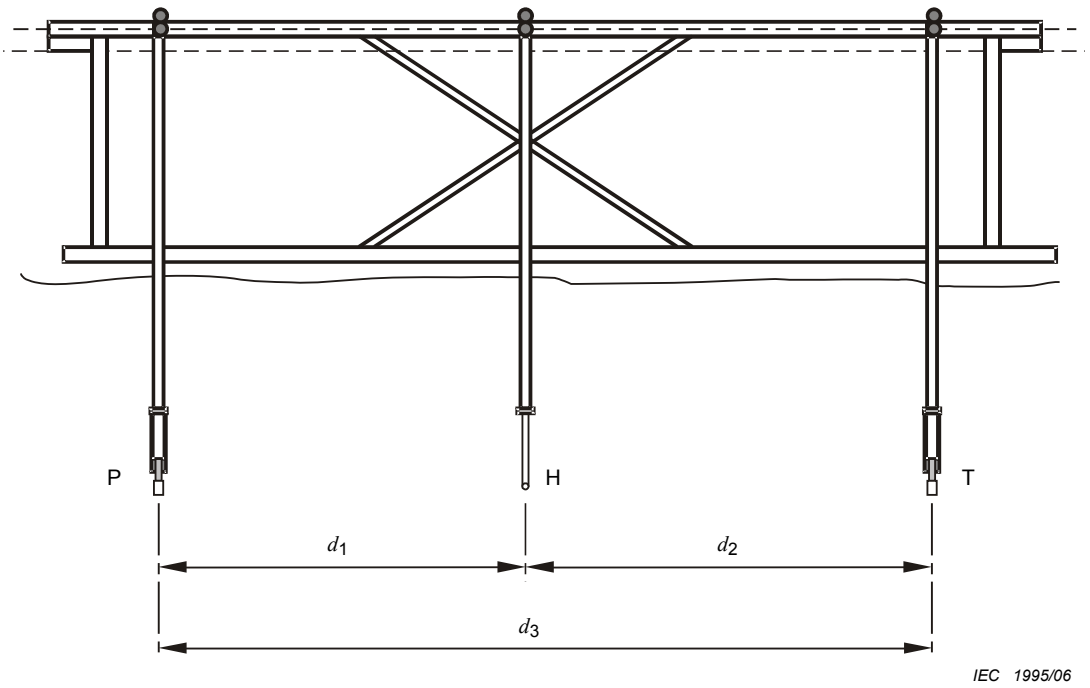


Figure 2 – Cadre de mesure pour soutenir les trois transducteurs en ligne: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 3 Since the distances and sound speed do not appear explicitly in a phase term in equation (24), the accuracy of the calculated phase of M_{H} is only limited by accuracy of the phase measurements of the voltages and currents and by positioning. A special measurement framework that can minimize positioning errors is illustrated by Figure 2.

Measurements shall be made as follows:

a) Mount the transducers as shown in Figure 2 with their reference centres separated by the distances d_1, d_2 and d_3, where $d_3 = d_2 - d_1$. Align their reference directions with P pointing toward H and T. Determine the complex electrical transfer impedance Z_{PH} from the input current to P and the output voltage from H.

b) Remove the hydrophone with its hanger from the framework. Determine the complex electrical transfer impedance Z_{PT} from the input current to P and the output voltage from T.

c) Replace the hydrophone with its hanger in the framework and rotate about its reference centre so that T now points toward H and the distance d_3 is maintained between the reference centres of H and T. Determine the complex electrical transfer impedance Z_{TH} from the input current to T and the output voltage from H.

Calculate the magnitude and phase angle of the free field sensitivity of the hydrophone from equation (24) using the measured electrical transfer impedances [23].

NOTE 3 The resulting sensitivity is representative of both the hydrophone and its hanger.

NOTE 4 The calibration should be performed using the same hanger that will support the hydrophone when it is used for field measurements. (See 6.2)

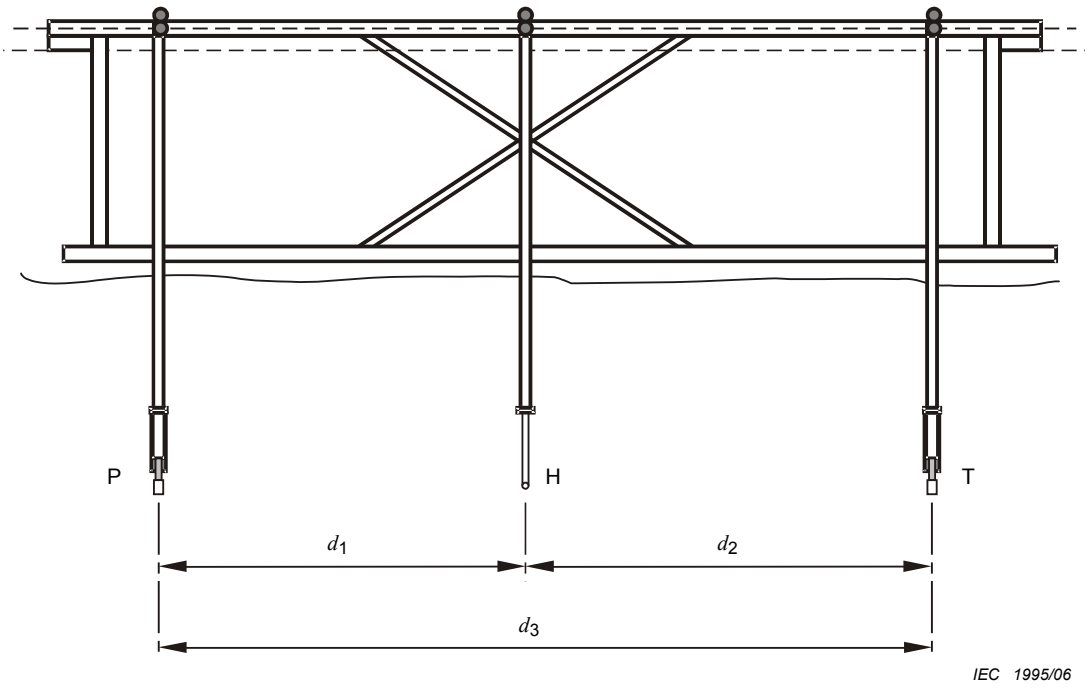


Figure 2 – Measurement framework for supporting in-line the three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.3 Distance de séparation

La distance d entre le projecteur et l'hydrophone doit être suffisamment grande pour réduire les erreurs dues aux dimensions finies des transducteurs.

A cet effet, la séparation doit être plus grande que la taille du plus grand des transducteurs, et l'hydrophone doit être dans le champ lointain de la source (voir 3.12).

Pour les deux transducteurs dont les dimensions maximales des surfaces sensibles sont a_1 et a_2 respectivement, la distance doit être choisie d'après la relation:

$$d > \frac{a_1^{\,2} + a_2^{\,2} + a_1 a_2}{\lambda} \tag{25}$$

et simultanément:

$$d > 5a_1 \text{ et } d > 5a_2 \tag{26}$$

afin que l'erreur provoquée par un défaut de répartition sphérique soit inférieure à 0,3 dB. Afin d'obtenir une séparation qui réduise l'incertitude à moins de 0,2 dB, la partie droite de l'équation (25) doit être multipliée par un facteur de 1,2.

Lors de la mesure de la réponse directionnelle d'un transducteur, la distance entre le projecteur et l'hydrophone doit être quelque peu supérieure à celle donnée par (25) et (26). La distance ne doit pas être inférieure à deux fois celle donnée par l'équation (25) ou l'équation (26), en prenant celle des deux valeurs qui est la plus élevée, voir l'Annexe C et [1], [41] et [42].

8.4 Distance minimale entre transducteurs et surfaces délimitantes

Avec des signaux d'impulsion sonore, les interférences dues aux réflexions doivent être éliminées en choisissant la distance minimale entre les transducteurs et chaque surface délimitante (surface de séparation de l'eau avec l'atmosphère, parois latérales et de fond), de sorte que le retard des signaux réfléchis sur le signal direct soit supérieur à la durée de la salve (voir l'Annexe C).

Avec des signaux continus, la distance comptée depuis les transducteurs jusqu'à chaque limite doit être telle que les variations de la pression acoustique directe, provoquées par les interférences dues aux réflexions sur ces surfaces délimitantes, soient inférieures à 0,3 dB.

NOTE La distance minimale qui permet de satisfaire à cette exigence dépend aussi de la directivité des transducteurs, du coefficient de réflexion des surfaces délimitantes et du type de signal: sinusoïdal ou signaux d'impulsion sonore déclenchée.

8.5 Limites en fréquence

8.5.1 Limite de haute fréquence

On doit prendre en considération les limites de la méthode à des fréquences élevées, et l'influence de toutes les limites doit être réfléchie dans l'évaluation de l'incertitude globale.

NOTE 1 La limite de haute fréquence est régie par un certain nombre de facteurs. Ceux-ci sont décrits en détails à l'Annexe C (voir C.2.9).

NOTE 2 A des fréquences supérieures à 0,5 MHz, il convient de tenir compte de l'utilisation de la méthode alternative décrite dans la CEI 60866.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.3 Separation distance

The distance d between the projector and the hydrophone shall be large enough to minimize errors due to the finite size of the transducers.

For this purpose, the separation shall be larger than the size of the largest transducer, and the hydrophone shall be in the far field of the source (see 3.12).

For the two transducers with maximum dimensions of the sensitive areas of a_1 and a_2 respectively, the distance shall be chosen according to the relation:

$$d > \frac{a_1^{\,2} + a_2^{\,2} + a_1 a_2}{\lambda} \tag{25}$$

and simultaneously:

$$d > 5a_1 \text{ and } d > 5a_2 \tag{26}$$

in order to reduce the error due to lack of spherical divergence to below 0,3 dB. To obtain a separation that reduces the uncertainty to less than 0,2 dB, the right hand side of equation (25) shall be multiplied by a factor of 1,2.

When measuring the directional response of a transducer, the distance between the projector and the hydrophone shall be somewhat larger than that given by (25) and (26). The distance shall be no less than twice that given by equation (25) or equation (26), whichever is larger, see Annex C and [1], [41] and [42].

8.4 Minimum distance from transducers to boundary surface

With tone-burst signals, interference with the reflections shall be eliminated by choosing the minimum distance from the transducers to each boundary surface (water surface, bottom and side walls) such that the delay of the reflected signals with respect to the direct signal is greater than the burst length (see Annex C).

With continuous signals, the distance from the transducers to each boundary shall be such that the variation in the direct sound pressure, due to the interference with the reflections from those boundaries is less than 0,3 dB

NOTE The minimum distance to the boundaries, satisfying this requirement, depends also on the directivity of the transducers, the reflection coefficient of the boundary surfaces and on the signal type: sinusoidal or gated tone burst signals.

8.5 Frequency limitation

8.5.1 High-frequency limit

Due consideration shall be given to the limitations of the method at high frequencies, and the influence of any limitations shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty.

NOTE 1 The high frequency limit is governed by a number of factors. These are described in detail in Annex C (see C.2.9).

NOTE 2 At frequencies greater than 0,5 MHz, consideration should be given to the use of the alternative method described in IEC 60866.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.5.2 Limite de basse fréquence

On doit prendre en considération les limites de la méthode à des fréquences basses, et l'influence de toutes les limites doit être réfléchie dans l'évaluation de l'incertitude globale.

NOTE 1 La fréquence la plus basse pour les étalonnages est limitée par plusieurs facteurs. Ceux-ci sont décrits en détails à l'Annexe C (voir C.2.10).

NOTE 2 Pour la plupart des grandes cuves d'essai ayant une dimension minimale de 5 m ou plus, la limite de basse fréquence pour l'étalonnage des hydrophones sera en pratique de l'ordre de 1 kHz ou 2 kHz, en fonction du facteur Q du transducteur.

8.6 Mesures et vérifications

8.6.1 Généralités

L'étalonnage doit être effectué conformément aux Articles 6 et 7. Voir la CEI 60866, la CEI 60500, [1], [2], [8], [12], et [24] à [51].

8.6.2 Alignement

Avant l'étalonnage, une direction de référence doit être définie pour chaque transducteur.

NOTE 1 Cette direction de référence est la direction pour laquelle l'étalonnage en champ libre sera valable. La direction de référence coïncidera souvent avec l'axe principal du transducteur (voir 3.1, 3.5, 3.18 et 3.23).

Pour les hydrophones omnidirectionnels avec une construction symétrique, la direction de référence doit être indiquée par une marque sur le corps de l'hydrophone.

NOTE 2 La direction peut être choisie en déterminant l'angle de réponse maximal de l'hydrophone à une fréquence donnée, en effectuant une mesure de la réponse directionnelle (voir l'Annexe A).

Avant la mesure de chaque impédance électrique de transfert, le couple de transducteurs correspondant doit être orienté de sorte que les directions de référence des transducteurs soient alignées.

NOTE 3 Cet alignement peut être effectué manuellement ou mécaniquement à l'aide d'un système d'assemblage ou de positionnement particulier.

NOTE 4 Pour les transducteurs qui présentent une directivité appréciable autour de leur axe principal (par exemple, transducteurs piston), les transducteurs peuvent être alignés acoustiquement en recherchant le signal reçu maximal à une fréquence spécifique. La direction de référence peut parfois être choisie dans la partie du diagramme de réponse directionnelle dans laquelle la réponse ne varie pas de façon significative avec l'angle directionnel.

8.6.3 Mesures électriques

La mesure électrique de la tension en circuit ouvert et du courant traversant le projecteur doit être effectuée conformément à 7.3 et 7.4.

8.6.4 Vérification de l'onde sphérique

On doit prendre en considération l'écart par rapport au champ d'onde sphérique supposé, et l'influence de tout écart doit être réfléchie dans l'évaluation de l'incertitude globale.

NOTE L'existence d'un champ acoustique à propagation sphérique peut être vérifiée par comparaison des modules de l'impédance électrique de transfert lorsque la distance entre le projecteur et l'hydrophone est modifiée. Voir 7.5, NOTE 3 et l'Annexe C (C.2.11). Dans des conditions idéales, il convient qu'il soit possible d'obtenir un écart inférieur à ±2 %. Une variation de plus de ±5 % peut indiquer des problèmes supplémentaires (par exemple à partir des réflexions limites) et il convient qu'elle soit examinée davantage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.5.2 Low frequency limit

Due consideration shall be given to the limitations of the method at low frequencies, and the influence of any limitations shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty.

NOTE 1 The lowest frequency for calibrations is limited by several factors. These are described in detail in Annex C (see C.2.10).

NOTE 2 For most large test tank facilities of minimum dimension 5 metres or greater, the practical low frequency limit for calibration of hydrophones will be of the order of 1 kHz or 2 kHz depending on the Q-factor of the transducer.

8.6 Measurements and checks

8.6.1 General

The calibration shall be performed in accordance with Clauses 6 and 7. See IEC 60866, IEC 60500, [1], [2], [8], [12], and [24] to [51].

8.6.2 Alignment

Before calibration, a reference direction shall be defined for each transducer.

NOTE 1 This reference direction is the direction for which the free-field calibration will be valid. Often, the reference direction will coincide with the principal axis of the transducer (see 3.1, 3.5, 3.18 and 3.23).

For omnidirectional hydrophones with a symmetric construction, the reference direction shall be indicated by a mark on the body of the hydrophone.

NOTE 2 The direction may be chosen by determining the maximum response angle of the hydrophone at a stated frequency by undertaking a directional response measurement (see Annex A).

Before the measurement of each electrical transfer impedance, the relevant transducer pair shall be oriented such that the reference directions of the transducers are aligned.

NOTE 3 This alignment may be performed either manually, or mechanically using special rigging or positioning system.

NOTE 4 For transducers that show appreciable directivity about their principal axis (for example, piston transducers), the transducers may be aligned acoustically by looking for the maximum received signal at a specific frequency. Sometimes the reference direction may be chosen in the portion of the directional response pattern where the response does not change significantly with the directional angle.

8.6.3 Electrical measurements

The electrical measurement of open circuit voltage and projector current shall be made in accordance with 7.3 and 7.4.

8.6.4 Spherical-wave verification

Due consideration shall be given to the deviation from the assumed spherical-wave field, and the influence of any deviation shall be reflected in the evaluation of overall uncertainty.

NOTE The existence of a spherically-spreading acoustic field may be verified by comparison of the electrical transfer impedance magnitudes when the distance between projector and hydrophone is varied. See 7.5, NOTE 3 and Annex C (C.2.11). In ideal conditions, it should be possible to obtain deviation of less than ±2 %. Variation of greater than ±5 % may indicate additional problems (e.g. from boundary reflections) and should be investigated further.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.6.5 Mise en évidence des effets d'interférence

On doit veiller à s'assurer que les interférences provenant de la diaphonie électrique ne sont pas présentes au cours des mesures. Lorsque des signaux d'impulsion sonore sont utilisés, la diaphonie doit être éliminée par des fenêtres de temps. Afin d'éviter les interférences lorsque la diaphonie électrique est présente, la durée de l'impulsion sonore ne doit pas être supérieure au temps de propagation acoustique, de sorte que les deux signaux ne puissent pas se chevaucher dans le temps.

Avec des signaux d'impulsion sonore, une fréquence de répétition d'impulsion sonore doit être choisie et doit être suffisamment faible pour que toute réverbération dans la cuve disparaisse avant la transmission de la prochaine impulsion.

NOTE 1 D'autres détails sur l'influence des réflexions sont donnés en Annexe C (voir C.2.12).

NOTE 2 Lorsque des ondulations périodiques lisses peuvent être observées sur un tracé de l'impédance électrique de transfert (ou de la sensibilité) en fonction de la fréquence, il s'agit d'une indication selon laquelle il peut y avoir des réflexions acoustiques présentes, entraînant des effets d'interférence constructifs et destructifs. Si l'intervalle de fréquence entre des crêtes successives dans le tracé est $\Delta f,$ et si c est la vitesse du son dans le milieu, la différence de trajet, $\Delta d,$ entre les signaux directs et réfléchis arrivant au niveau de l'hydrophone, doit être calculée par [1]:

$$\Delta d = \frac{c}{\Delta f} \tag{27}$$

8.6.6 Vérification de la réciprocité

Etant donné que la méthode dépend de l'hypothèse selon laquelle au moins un transducteur est réciproque, cette hypothèse doit être vérifiée. La réciprocité d'une paire de transducteurs réciproques doit être vérifiée en comparant les modules de l'impédance électrique de transfert lorsque les fonctions de l'émetteur et du récepteur sont interverties sans modifier la position des transducteurs (c'est-à-dire en comparant Z_{PT} et Z_{TP}, où P et T sont réciproques) [12].

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

NOTE 2 Un désaccord de plus de ±5 % indique qu'au moins un des transducteurs peut ne pas se comporter de manière réciproque. L'utilisation d'un troisième transducteur réversible dans la vérification de la réciprocité peut révéler lequel des transducteurs n'est pas réciproque. Dans un étalonnage par réciprocité, des transducteurs non réciproques peuvent uniquement être utilisés comme projecteur ou comme hydrophone (selon le cas).

Si des divergences importantes entre Z_{PT} et Z_{TP} se produisent parce qu'un transducteur (ou les deux) est trop sollicité, entraînant un comportement non linéaire, l'amplitude du signal d'entraînement vers les transducteurs doit alors être réduite. Cependant, si une réduction de ce type entraîne un rapport signal sur bruit inacceptablement faible, il faut prendre en considération l'utilisation de transducteurs alternatifs.

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

NOTE 3 L'utilisation d'un transducteur à des fréquences hors de cette bande (par exemple, à des fréquences bien supérieures à la fréquence de résonance) peut entraîner un comportement non réciproque et une dégradation de la précision de l'étalonnage.

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

NOTE 5 Si les transducteurs dans la vérification de la réciprocité sont de construction identique, ils peuvent être non linéaires de la même façon et sembler alors réciproques. Par conséquent, il convient d'effectuer la vérification de la réciprocité en utilisant des transducteurs de construction différente, avant que l'un d'eux puisse être considéré comme réciproque.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.6.5 Evidence of interference effects

Care shall be taken to ensure that interference from electrical cross-talk is not present during measurements. When tone-burst signals are used, the cross-talk shall be eliminated by time-windowing. In order to avoid interference when electrical cross-talk is present, the tone-burst duration shall not be greater than the acoustic propagation delay, so that the two signals cannot overlap in time.

With tone-burst signals, a tone-burst repetition rate shall be chosen that is low enough for all reverberation in the tank to die away before transmission of the next pulse.

NOTE 1 Further details on the influence of reflections are given in Annex C (see C.2.12).

NOTE 2 Where smooth periodic ripples can be observed in a plot of electrical transfer impedance (or sensitivity) against frequency, this is an indication that there is likely to be acoustic reflections present leading to constructive and destructive interference effects. If the frequency interval between successive peaks in the plot is Δf, and c is the speed of sound in the medium, the path difference, Δd, between the direct and reflected signals arriving at the hydrophone shall be calculated by [1]:

$$\Delta d = \frac{c}{\Delta f} \tag{27}$$

8.6.6 Reciprocity verification

Since the method depends upon the assumption that at least one transducer is reciprocal, this assumption shall be verified. The reciprocity of a pair of reciprocal transducers shall be verified by comparison of the electrical transfer impedance magnitudes when the functions of the transmitter and receiver are interchanged without altering the transducer positions (i.e., by comparing Z_{PT} and Z_{TP} where both P and T are reciprocal) [12].

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

NOTE 2 Disagreement of greater than ±5 % indicates that at least one of the transducers might not be behaving in a reciprocal manner. The use of a third reversible transducer in the reciprocity verification may reveal which of the transducers is non-reciprocal. In a reciprocity calibration, non-reciprocal transducers may only be used as a projector or hydrophone (as appropriate).

If large discrepancies between Z_{PT} and Z_{TP} occur because one (or both) transducers is driven too hard, resulting in non-linear behaviour, then the amplitude of the drive signal to the transducers shall be reduced. However, if such a reduction results in unacceptably low signal-to-noise ratio, consideration shall be given to the use of alternative transducers.

For the lowest uncertainty in reciprocity calibrations, the reciprocal transducers shall be used within their normal operating band (typically up to the frequency of the first resonance for a piezoelectric transducer).

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

NOTE 4 Calibration of a hydrophone over a broad frequency range may require the use of several different reciprocal transducers to cover the complete range with sufficiently small uncertainty.

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.6.7 Vérification de la linéarité

S'il y a un doute concernant la linéarité des transducteurs, la linéarité de chaque couple de transducteurs doit être vérifiée par comparaison des modules de l'impédance électrique de transfert relevés pour différents niveaux du courant du projecteur, compris dans l'intervalle dynamique de fonctionnement du système, à une fréquence donnée. Depuis le niveau situé à 20 dB au-dessus du bruit de fond, jusqu'au niveau maximal, le module de l'impédance de transfert ne doit pas dépasser ±5 %.

NOTE Pendant les opérations d'étalonnage proprement dit, il convient de s'assurer que les niveaux des signaux sont compris dans la région de linéarité. Sachant que cette région peut varier pour chaque couple de transducteurs, une observation minutieuse des niveaux des signaux est nécessaire.

8.6.8 Sensibilité en champ libre

D'après les équations (10) et (12) de 8.2, les sensibilités en champ libre M_{H} de l'hydrophone H à étalonner et M_{T} du transducteur réciproque T doivent être calculées à partir des modules de l'impédance électrique de transfert mesurés à chaque fréquence. Si le projecteur P est réciproque, sa sensibilité en champ libre doit être calculée à partir de sa réponse à l'émission en courant S_{P} à l'aide de la relation de réciprocité donnée par l'équation (9) avec T remplacé par P.

NOTE 1 Si le projecteur n'est pas réciproque, sa sensibilité de réception calculée n'a alors pas de signification physique.

Pour l'incertitude la plus faible, l'étalonnage doit être répété un certain nombre de fois et la moyenne des résultats à chaque fréquence doit être utilisée comme la valeur finale de sensibilité. Les étalonnages répétés doivent être réellement indépendants, les transducteurs étant retirés de l'eau et remontés entre chaque étalonnage.

NOTE 2 Si une distance de séparation différente est utilisée pour certains des étalonnages répétés, ceci facilitera l'évaluation de certaines hypothèses de la méthode (conditions de champ libre, champ d'onde sphérique, etc.), étant donné qu'il convient que la sensibilité ne varie pas avec la distance de séparation.

L'écart-type doit être déterminé et utilisé dans le calcul des incertitudes, voir l'Annexe D.

NOTE 3 Le manque de bonne répétabilité indique un problème avec l'étalonnage et il convient d'en rechercher la cause. Il est possible d'obtenir, avec précaution, des écarts-types pouvant descendre jusqu'à 1 % pour les hydrophones dans leur plage de fonctionnement.

8.6.9 Réponse à l'émission en courant

D'après les équations (11) et (12) de 8.2, la réponse à l'émission en courant S_{T} du transducteur réciproque T et S_{P} du projecteur P doit être calculée à partir des modules de l'impédance électrique de transfert mesurés à chaque fréquence. Si l'hydrophone H est réciproque, sa réponse à l'émission en courant S_{H} doit être calculée à partir de sa sensibilité en champ libre, à l'aide de l'équation (9) avec T remplacé par H.

NOTE La réponse à l'émission n'a pas de signification physique lorsque le transducteur ne peut pas être utilisé comme source sonore (par exemple, pour un hydrophone avec un préamplificateur intégré, ce qui exclut son utilisation comme projecteur).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.6.7 Linearity verification

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

NOTE Care should be taken that during the actual calibration, the signal levels are kept within the range of linearity. As this range may be different for each pair of transducers, careful observation of the signal levels is necessary.

8.6.8 Free-field sensitivity

By means of equations (10) and (12) of 8.2, the free-field sensitivities M_{H} of the hydrophone H to be calibrated and M_{T} of the reciprocal transducer T shall be calculated from the electrical transfer impedance magnitudes measured at each frequency. If the projector P is reciprocal, its free-field sensitivity shall be calculated from its transmitting response to current S_{P} using the reciprocity relationship given by equation (9) with T replaced by P.

NOTE 1 If the projector is not reciprocal, then its calculated receive sensitivity has no physical meaning.

For the lowest uncertainty, the calibration shall be repeated a number of times and the mean of the results at each frequency shall be used as the final value of sensitivity. The repeated calibrations shall be truly independent, with the transducers removed from the water and remounted between each calibration.

NOTE 2 If a different separation distance is used for some of the repeated calibrations, this will be of assistance in assessing some of the assumptions in the method (free-field conditions, spherical-wave field, etc.) since the sensitivity should be invariant with separation distance.

The standard deviation shall be determined and used in the calculation of uncertainties, see Annex D.

NOTE 3 Lack of good repeatability indicates a problem with the calibration and the cause should be investigated. With care, it is possible to achieve standard deviations as low as 1 % for hydrophones over their operating range.

8.6.9 Transmitting response to current

By means of equations (11) and (12) of 8.2, the transmitting response to current S_{T} of the reciprocal transducer T and S_{P} of the projector P shall be calculated from the electrical transfer impedance magnitudes measured at each frequency. If the hydrophone H is reciprocal, its transmitting response to current S_{H} shall be calculated from its free-field sensitivity by use of equation (9) with T replaced by H.

NOTE The transmitting response has no physical meaning where the transducer cannot be used as a sound source (for example, for a hydrophone with an integral preamplifier, which precludes its use as a projector).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.7 Incertitude

NOTE 1 L'évaluation de l'incertitude pour la méthode d'étalonnage par réciprocité en champ libre implique de nombreux facteurs (voir l'Annexe D).

Conformément à la linéarité, à la réciprocité et aux conditions de champ libre spécifiées de 8.6.4 à 8.6.7, l'incertitude étendue globale (niveaux de confiance de 95 %) doit être inférieure à 1 dB en amplitude. Dans les mêmes conditions, l'incertitude étendue globale doit être inférieure à 6° en phase pour les fréquences jusqu'à 100 kHz.

NOTE 2 Dans la mesure où la fréquence augmente au-dessus de 100 kHz, l'incertitude pouvant être obtenue pour la phase augmente à plus de 6°.

9 Etalonnage en champ libre par comparaison

9.1 Principe

9.1.1 Généralités

Cet article décrit l'étalonnage des hydrophones dans des conditions de champ libre (voir 3.13) par comparaison avec un hydrophone étalon ou à l'aide d'un projecteur étalonné. L'étalonnage d'un hydrophone par comparaison nécessite soit un hydrophone étalonné et un projecteur auxiliaire, soit un projecteur étalonné [24].

9.1.2 Avec un hydrophone étalon

La pression acoustique, produite par le projecteur auxiliaire en un point dans le champ acoustique, est mesurée à l'aide d'un hydrophone étalonné. On remplace alors l'hydrophone étalonné par l'hydrophone inconnu. Le rapport des tensions en circuit ouvert des deux hydrophones est égal au rapport de leurs sensibilités en champ libre.

9.1.3 Avec un projecteur étalonné

La pression acoustique, produite par un projecteur étalonné en un point dans le champ acoustique, est déterminée en mesurant soit le courant circulant dans le projecteur, soit la tension à travers le projecteur, et en utilisant la réponse à l'émission en courant ou en tension, respectivement, et la distance d'essai. La mesure de la tension en circuit ouvert d'un hydrophone placé dans le champ acoustique connu détermine la sensibilité en champ libre de cet hydrophone.

9.2 Comparaison avec un hydrophone étalon

9.2.1 Distance de séparation

La distance d entre le projecteur et l'hydrophone doit être choisie conformément aux instructions données en 8.3.

NOTE Une distance inférieure à celle qui est requise pour satisfaire aux conditions de champ libre peut être admise dans le cas où l'hydrophone inconnu est comparé avec un hydrophone étalonné au même endroit du champ acoustique. Ceci est possible lorsque les deux hydrophones sont exposés à la même pression acoustique et si aucun des deux hydrophones ne répond aux gradients de pression acoustique. Pour cela, il convient que les deux hydrophones soient essentiellement avoir une structure identique, ou qu'ils aient des dimensions bien inférieures à une longueur d'onde acoustique [41].

9.2.2 Profondeur d'immersion du transducteur

Afin d'éviter des fluctuations intenses du champ acoustique provoquées par des réflexions de surface, la profondeur d'immersion des transducteurs doit être choisie selon les exigences relatives aux étalonnages par réciprocité (voir 8.4).

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.7 Uncertainty

NOTE 1 The evaluation of uncertainty for the free-field reciprocity calibration method involves many components (see Annex D).

In accordance with the linearity, reciprocity and free-field conditions specified in 8.6.4 to 8.6.7, the overall expanded uncertainty (95 % confidence levels) shall be less than 1 dB in magnitude. Under the same conditions, the overall expanded uncertainty shall be less than 6° in phase for frequencies up to 100 kHz.

NOTE 2 As the frequency increases above 100 kHz, the achievable uncertainty for phase increases to greater than 6°.

9 Free-field calibration by comparison

9.1 Principle

9.1.1 General

The calibration of hydrophones in free field conditions (see 3.13) by comparison with a standard hydrophone or by using a calibrated projector is described. Calibration of a hydrophone by comparison requires either a calibrated hydrophone and an auxiliary projector, or a calibrated projector [24].

9.1.2 With a standard hydrophone

The sound pressure at a point in the sound field, generated by the auxiliary projector, is measured with a calibrated standard hydrophone. Then the calibrated hydrophone is replaced by the unknown hydrophone. The ratio of the open circuit voltages of the two hydrophones is equal to the ratio of their free field sensitivities.

9.1.3 With a calibrated projector

The sound pressure at a point in the sound field, generated by a calibrated projector, is determined by measuring either the current through the projector or the voltage across the projector and using the transmitting current or voltage response, respectively, and the test distance. Measurement of the open circuit voltage of a hydrophone placed in the known sound field determines the free field sensitivity of that hydrophone.

9.2 Comparison with a standard hydrophone

9.2.1 Separation distance

The distance d between the projector and the hydrophone shall be chosen according to the instructions given in 8.3.

NOTE A distance smaller than that required for free-field conditions may be acceptable when the unknown hydrophone is compared with a calibrated hydrophone at the same place in the sound field. This is possible when the two hydrophones are exposed to the same acoustic pressure and neither hydrophone responds to acoustic pressure gradients. To achieve this, the two hydrophones should essentially be identical in structure, or both should have dimensions much less than an acoustic wavelength [41].

9.2.2 Transducer depth

To avoid strong fluctuations introduced in the sound field by reflections from the water surface, the depth of the transducers shall be chosen according to the requirements specified for reciprocity calibrations (see 8.4).

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

9.2.3 Forme du signal

La forme du signal doit être la même que celle qui est décrite pour l'étalonnage par réciprocité (voir 8.5).

9.2.4 Mesures

L'étalonnage doit être effectué dans les conditions spécifiées à l'Article 6.

La tension en circuit ouvert de l'hydrophone inconnu placé dans le champ acoustique doit être mesurée à l'extrémité du câble (voir 7.3).

La tension en circuit ouvert aux bornes électriques de l'hydrophone standard étalonné doit être mesurée comme spécifié avec la courbe d'étalonnage de cet hydrophone.

Lorsque cette mesure est effectuée dans l'air, la mesure doit être exécutée dans une chambre anéchoïque, utilisée généralement pour l'étalonnage des microphones.

NOTE Cette mesure peut être effectuée dans l'eau ou dans l'air. Dans ce dernier cas, un microphone étalonné peut remplacer l'hydrophone étalon.

9.2.5 Sensibilité en champ libre

La sensibilité de l'hydrophone en essai doit être calculée à partir du rapport des tensions en circuit ouvert des deux hydrophones et de la sensibilité de l'hydrophone étalon.

NOTE Connaissant la sensibilité de l'hydrophone étalon, la sensibilité de l'hydrophone en essai peut être calculée.

9.2.6 Incertitude

L'incertitude globale pour l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. Avec précaution et en utilisant des hydrophones dans leur plage de fonctionnement principale, une incertitude globale (niveaux de confiance de 95 %) doit être obtenue, supérieure ou égale à 1,5 dB.

NOTE L'étalonnage de l'hydrophone par une méthode de comparaison fournira en général une incertitude plus élevée que par une méthode primaire (telle qu'une méthode fondée sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude dans l'étalonnage de l'hydrophone de référence introduira inévitablement un facteur élevé d'incertitude de type B. Des lignes directrices supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données en Annexe D.

9.3 Etalonnage avec un projecteur étalonné

9.3.1 Distance de séparation

La distance entre le projecteur et l'hydrophone doit être choisie conformément à 9.2.1. Afin de réduire les erreurs dues à la répartition non sphérique de l'émission ainsi qu'à la diffraction, la distance de séparation doit être proche de la distance d'étalonnage spécifiée pour le projecteur, à condition que les dimensions de l'hydrophone soient suffisamment faibles pour que les conditions définies par les relations (25) et (26) puissent être remplies.

NOTE Le projecteur a été étalonné pour une certaine distance ou dans une certaine gamme de distances.

9.3.2 Profondeur d'immersion du transducteur

La profondeur d'immersion des transducteurs est choisie conformément aux spécifications relatives à l'étalonnage par réciprocité (voir l'Article 8).

9.3.3 Forme du signal

La forme du signal doit être conforme à 8.5.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

9.2.3 Signal type

The signal type shall be the same as specified for the reciprocity calibration (see 8.5).

9.2.4 Measurements

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

The open-circuit voltage of the unknown hydrophone in the sound field shall be measured at the end of the cable (see 7.3).

The open-circuit voltage at the calibrated standard hydrophone electrical terminals shall be measured as specified with the calibration curve of that hydrophone.

When this measurement is performed in air, the measurement shall be carried out in an anechoic room as is generally used for the calibration of microphones.

NOTE This measurement can be performed in water or in air. In the latter case, a calibrated microphone may replace the standard hydrophone.

9.2.5 Free-field sensitivity

The sensitivity of the hydrophone under test shall be calculated from the ratio of the open-circuit voltages of both hydrophones and the sensitivity of the standard hydrophone.

NOTE Because the sensitivity of the standard hydrophone is known, the sensitivity of the hydrophone under test can be calculated.

9.2.6 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. With care and when using hydrophones within their main operating range, an overall uncertainty (95 % confidence levels) shall be achieved which is 1,5 dB or better.

NOTE Hydrophone calibration by a comparison method will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference hydrophone will inevitably introduce a large Type B component of uncertainty. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex D.

9.3 Calibration with a calibrated projector

9.3.1 Separation distance

The distance between the projector and the hydrophone shall be chosen in accordance with 9.2.1. In order to reduce errors due to non-spherical spreading and diffraction, the separation distance shall be close to the specified calibration distance of the projector, provided that the size of the hydrophone is small enough for the relations (25) and (26) to be fulfilled.

NOTE The projector has been calibrated at a certain distance or within a given range of distances.

9.3.2 Transducer depth

The depth of the transducers is chosen in accordance with the specifications for reciprocity calibration (see Clause 8).

9.3.3 Signal type

The signal type shall be in accordance with 8.5.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE Si le projecteur a été étalonné avec un signal de forme donnée, il est recommandé d'utiliser ce même signal lorsque ce projecteur constitue une source sonore étalonnée.

9.3.4 Mesures

L'étalonnage doit être effectué dans les conditions spécifiées à l'Article 6. La mesure de la tension en circuit ouvert U_{PH} doit être conforme à 7.3. La mesure du courant traversant le projecteur I_{P} doit être conforme à 7.4. Le module de l'impédance électrique de transfert $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ doit être obtenu conformément à 7.5.

La vérification du champ libre doit être effectuée conformément à 8.6.4 et 8.6.5, et la vérification de la linéarité conformément à 8.6.7.

A partir des valeurs mesurées de U_{PH}, I_{P} et $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ et de la réponse connue à l'émission en courant S_{P} du projecteur, la sensibilité en champ libre M_{H} de l'hydrophone doit être calculée à l'aide de l'équation suivante, déduite des équations (4) et (5).

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{d\, U_{\mathrm{PH}}}{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}} = \frac{d\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|}{S_{\mathrm{P}}} \tag{28}$$

NOTE Il convient de mentionner les bornes électriques de l'hydrophone entre lesquelles a été effectué l'étalonnage en même temps que le résultat.

9.3.5 Incertitude

L'incertitude globale pour l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. Avec précaution et lorsque l'hydrophone et le projecteur sont utilisés dans leur plage de fonctionnement principale, une incertitude étendue globale (niveaux de confiance de 95 %) de 2 dB ou plus doit être obtenue.

NOTE L'étalonnage de l'hydrophone par l'utilisation d'un projecteur étalon fournira en général une incertitude plus élevée que par une méthode primaire (telle qu'une méthode fondée sur la réciprocité en champ libre), étant donné que l'incertitude dans l'étalonnage du projecteur de référence introduira inévitablement un facteur élevé d'incertitude. La stabilité du projecteur et le manque potentiel de conditions de champ libre peuvent également contribuer à une incertitude globale. Des lignes directrices supplémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont données en Annexe D.

10 Etalonnage par excitation hydrostatique

10.1 Principe

Cet Article décrit l'étalonnage des hydrophones sans transducteur étalon dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à 2 Hz par une pression hydrostatique variant de façon harmonique. Une méthode d'étalonnage absolu des hydrophones dans une chambre de petites dimensions est utilisée [1], [52].

10.2 Détermination de la pression équivalente

10.2.1 Généralités

Connecter une chambre de mesure fermée au moyen d'un tube flexible avec un petit récipient ouvert, le niveau de l'eau dans le récipient étant toujours supérieur à celui de la chambre de meure (voir la Figure 3).

NOTE Le récipient ouvert est déplacé verticalement à une fréquence harmonique.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE If the projector has been calibrated with a specific type of signal, it is advisable to use the same type when that projector acts as a calibrated sound source.

9.3.4 Measurements

The calibration shall be performed under the conditions specified in Clause 6. Measurement of the open-circuit voltage U_{PH} shall be in accordance with 7.3. Measurement of the projector current I_{P} shall be in accordance with 7.4. The electrical transfer impedance magnitude $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ shall be obtained in accordance with 7.5.

The free-field verification shall be performed in accordance with 8.6.4 and 8.6.5, and the linearity verification according to 8.6.7.

With the measured values of U_{PH}, I_{P} and $\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|$ and with the known transmitting response to current S_{P} of the projector, the free field sensitivity M_{H} of the hydrophone shall be calculated with the following equation, derived from the equations (4) and (5).

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{d\,U_{\mathrm{PH}}}{S_{\mathrm{P}} I_{\mathrm{P}}} = \frac{d\left|Z_{\mathrm{PH}}\right|}{S_{\mathrm{P}}} \tag{28}$$

NOTE The electrical terminals of the hydrophone to which the calibration refers should be specified with the result.

9.3.5 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. With care and when both the hydrophone and the projector are used within their main operating range, an overall expanded uncertainty (95 % confidence levels) of 2 dB or better shall be achieved.

NOTE Hydrophone calibration by use of a standard projector will in general have higher uncertainty than a primary method (such as a method based on free-field reciprocity) since the uncertainty in the calibration of the reference projector will inevitably introduce a large component of uncertainty. The stability of the projector and the potential lack of free-field conditions may also contribute to overall uncertainty. More guidance on assessment of uncertainties is given in Annex D.

10 Calibration by hydrostatic excitation

10.1 Principle

The calibration of hydrophones without a standard transducer in the frequency range from 0,01 Hz to 2 Hz by harmonically changing hydrostatic pressure is described. A method of absolute calibration of hydrophones in a small chamber is used [1], [52].

10.2 Determination of equivalent pressure

10.2.1 General

Connect a closed measuring chamber by means of a flexible tube with an open small vessel with the water level in the vessel always higher than the measuring chamber (see Figure 3).

NOTE The open vessel moves vertically at a harmonic frequency.

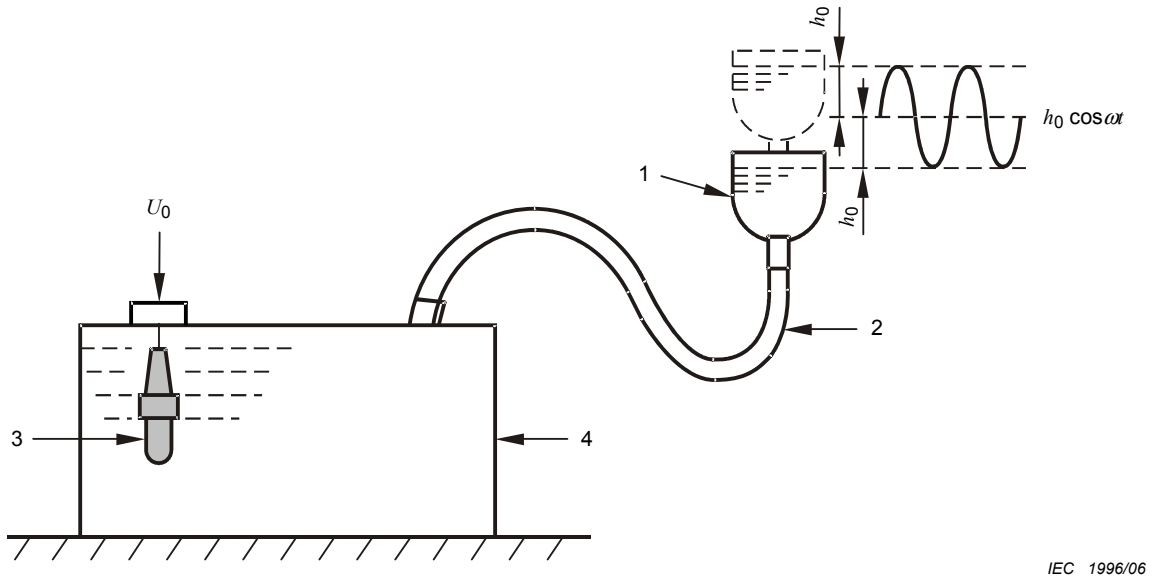
--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La variation du niveau d'eau dans le récipient ouvert doit être exprimée comme suit:

$$h = h_0 \cos \omega t \tag{29}$$

où h_0 est l'amplitude de la variation du récipient ouvert et ω est la fréquence angulaire de vibration.



Légende

1 Récipient ouvert
2 Tube flexible
3 Hydrophone
4 Chambre de mesure

Figure 3 – Schéma de la méthode de l'excitation hydrostatique

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

$$p = p_0 \cos \omega t \tag{30}$$

où p_0 est l'amplitude de la pression hydrostatique alternative. La pression hydrostatique alternative p est utilisée comme pression équivalente pour étalonner les hydrophones. A des fréquences basses (inférieures à 0,5 Hz), son amplitude est calculée conformément à l'équation suivante:

$$p_0 = \rho \, \mathrm{g} \, h_0 \tag{31}$$

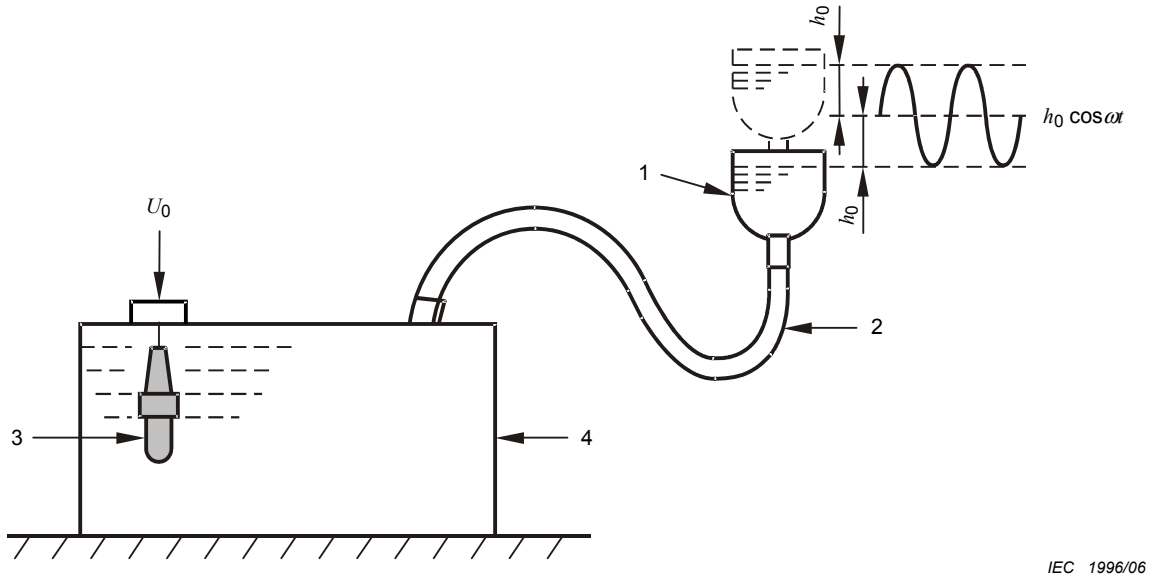
où ρ est la densité de l'eau et g est la constante gravitationnelle.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The displacement of the water level in the open vessel shall be expressed as:

$$h = h_0 \cos \omega t \tag{29}$$

where h_0 is the amplitude of the displacement of the open vessel and ω is the angular frequency of vibration.



Key

1 Open vessel
2 Flexible tube
3 Hydrophone
4 Measuring chamber

Figure 3 – Diagram of the method of hydrostatic excitation

Variation of the water level in the vessel produces an alternating hydrostatic pressure in the closed chamber:

$$p = p_0 \cos \omega t \tag{30}$$

where p_0 is the amplitude of the alternating hydrostatic pressure. The alternating hydrostatic pressure p is used as an equivalent pressure to calibrate hydrophones. At low frequencies (less than 0,5 Hz) its amplitude is calculated according to the following equation:

$$p_0 = \rho \, \mathrm{g} \, h_0 \tag{31}$$

where ρ is the density of water and g is the gravitational constant.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

A des fréquences élevées, la pression hydrostatique alternative p est influencée à la fois par la résonance de Helmholtz du système et l'inertie de l'eau dans le récipient ouvert et le tube flexible. La résonance du système augmentera la pression hydrostatique alternative, et l'inertie de l'eau réduira la pression hydrostatique alternative. En conséquence, l'amplitude de la pression hydrostatique alternative dans la chambre de mesure doit être déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$p_0 = \rho \, \mathrm{g} \, h_0 \left| K_0 \right| \left(1 - \frac{\omega^2}{\mathrm{g}} H_\mathrm{e} \right) \tag{32}$$

où $\left| K_0 \right|$ est le coefficient de majoration de la pression hydrostatique alternative. H_e, la hauteur équivalente (ayant la dimension de la longueur), est influencée par l'inertie de l'eau dans le récipient et dans le tube.

10.2.2 Détermination du coefficient de majoration

A des fréquences très basses, la résonance de Helmholtz du système est décrite à l'aide des paramètres localisés unidimensionnels. L'amplitude du coefficient de majoration $\left| K_0 \right|$ doit être calculée par l'expression:

$$\left| K_0 \right| = \frac{1}{\left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_\mathrm{r}^2} \right) \sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega}{Q \omega_\mathrm{r}} \right)^2 \Big/ \left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_\mathrm{r}^2} \right)^2}} \tag{33}$$

où ω_r est la fréquence angulaire de résonance du système et Q est le facteur de qualité mécanique.

Dans les conditions de $\omega_\mathrm{r} >> \omega$ et $Q > 2$, l'équation (33) doit être exprimée avec une précision suffisante, comme suit:

$$\left| K_0 \right| \approx 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\mathrm{r}} \right)^2 \tag{34}$$

10.2.3 Mesure de la fréquence de résonance du système d'étalonnage

La fréquence de résonance ω_r doit être mesurée et vérifiée après réalisation du système d'étalonnage. A cet effet, monter un projecteur piézo-électrique dans la chambre de mesure et balayer les fréquences avec un générateur de balayage dans la bande de fréquences contenant ω_r. Installer un hydrophone avec une sensibilité constante sur cette bande de fréquences dans la chambre et mesurer sa tension de sortie en circuit ouvert. La fréquence de résonance la plus basse du projecteur et de l'hydrophone doit être bien supérieure à ω_r. La fréquence de résonance du système doit être déterminée conformément à la réponse en fréquence de la tension de sortie de l'hydrophone.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

At high frequencies, the alternating hydrostatic pressure p is influenced by both the Helmholtz resonance of the system and the inertia of the water in the open vessel and the flexible tube. The resonance of the system will increase the alternating hydrostatic pressure, and the inertia of the water will reduce the alternating hydrostatic pressure. As a result, the amplitude of the alternating hydrostatic pressure in the measuring chamber shall be determined using the following equation:

$$p_0 = \rho \, \mathrm{g} \, h_0 \left| K_0 \right| \left(1 - \frac{\omega^2}{\mathrm{g}} H_\mathrm{e} \right) \tag{32}$$

where $\left| K_0 \right|$ is the factor by which the alternating hydrostatic pressure increases. H_e, called the equivalent height (having the dimension of the length), is influenced by the inertia of the water in the vessel and the tube.

10.2.2 Determination of the increasing factor

At very low frequencies, the Helmholtz resonance of the system is described using one-dimensional lumped parameters. The magnitude of the increasing factor $\left| K_0 \right|$ shall be calculated by the expression:

$$\left| K_0 \right| = \frac{1}{\left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_\mathrm{r}^2} \right) \sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega}{Q \omega_\mathrm{r}} \right)^2 \Big/ \left(1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_\mathrm{r}^2} \right)^2}} \tag{33}$$

where ω_r is the resonance angular frequency of the system and Q is the mechanical quality factor.

Under conditions of $\omega_\mathrm{r} >> \omega$ and $Q > 2$, equation (33) shall be expressed with sufficient accuracy as:

$$\left| K_0 \right| \approx 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\mathrm{r}} \right)^2 \tag{34}$$

10.2.3 Measurement of the resonance frequency of the calibration system

The resonance frequency ω_r shall be measured and verified after the calibration system has been completed. For this purpose, mount a piezoelectric projector into the measuring chamber and drive with a sweep generator in the frequency range containing ω_r. Install a hydrophone with constant sensitivity over this frequency range in the chamber and measure its open-circuit output voltage. The lowest resonance frequency of both the projector and the hydrophone shall be much greater than ω_r. The resonance frequency of the system shall be determined according to the frequency response of the output voltage of the hydrophone.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

10.2.4 Détermination de la hauteur équivalente

10.2.4.1 Généralités

La hauteur équivalente H_e doit être déterminée conformément à 10.2.4.2, 10.2.4.3 ou 10.2.4.4.

10.2.4.2 Méthode de mise à zéro de la pression hydrostatique alternative

La pression hydrostatique alternative dans la chambre de mesure doit être ajustée à zéro par l'une des deux façons suivantes [53]:

a) En ajoutant ou en retirant l'eau dans le récipient ouvert pour modifier le niveau de l'eau, la pression hydrostatique alternative p dans la chambre de mesure doit être ajustée à zéro à une fréquence spécifiée ω_0. A partir de l'équation (32), la hauteur équivalente doit être calculée par:

$$H_e + \Delta H = g/\omega_0^2 \tag{35}$$

où ΔH est la variation du niveau de l'eau et H_e est la hauteur équivalente initiale.

Modifier le niveau de l'eau à nouveau d'une quantité $-\Delta H$ pour que la hauteur équivalente retrouve sa valeur d'origine. La hauteur équivalente doit ensuite être calculée par:

$$H_e = g/\omega_0^2 - \Delta H \tag{36}$$

b) En maintenant le niveau de l'eau dans le récipient ouvert à une hauteur appropriée, ajuster la pression hydrostatique alternative dans la chambre de mesure à zéro en faisant varier la fréquence. La hauteur équivalente est à présent égale à g/ω_0^2, où ω_0 est la fréquence à laquelle la pression hydrostatique alternative atteint le niveau zéro. Dans cette méthode, le niveau de l'eau du récipient ouvert doit être suffisant pour s'assurer que ω_0 est supérieure à la fréquence limite supérieure de la plage d'étalonnage. Si le niveau de l'eau est modifié d'une quantité $-\Delta H$ pour que la pression hydrostatique alternative retrouve une valeur appropriée, la hauteur équivalente à ce point doit être obtenue à l'aide de l'expression (36).

10.2.4.3 Méthode de la variation du niveau de l'eau

Le niveau de l'eau dans le récipient ouvert étant à une certaine hauteur (en supposant que la hauteur équivalente du système est H_e pour le moment), et le récipient ouvert vibrant verticalement à une fréquence ω, mesurer la tension en circuit ouvert U_1 d'un hydrophone dans la chambre de mesure. Modifier le niveau d'eau du récipient ouvert d'une quantité ΔH, puis mesurer la tension en circuit ouvert de l'hydrophone, U_2. Avec ces deux mesures, la hauteur équivalente doit ensuite être déterminée conformément à l'équation:

$$H_e = \frac{g}{\omega^2} + \frac{U_1 \Delta H}{(U_2 - U_1)} \tag{37}$$

NOTE ΔH a une valeur positive lorsque le niveau de l'eau augmente et une valeur négative lorsque le niveau de l'eau diminue [53].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

10.2.4 Determination of the equivalent height

10.2.4.1 General

The equivalent height H_e shall be determined in accordance with 10.2.4.2,. 10.2.4.3 or 10.2.4.4.

10.2.4.2 Alternating hydrostatic pressure null method

The alternating hydrostatic pressure in the measuring chamber shall be adjusted to zero by one of two different ways [53]:

a) By adding or removing water in the open vessel to change the water level, the alternating hydrostatic pressure p in the measuring chamber shall be adjusted to zero at a specified frequency ω_0. From equation (32), the equivalent height shall be calculated by:

$$H_e + \Delta H = g/\omega_0^2 \tag{35}$$

where ΔH is the change in water level and H_e is the initial equivalent height.

Change the water level again by an amount $-\Delta H$ to restore the equivalent height to its original value. The equivalent height shall then be calculated by:

$$H_e = g/\omega_0^2 - \Delta H \tag{36}$$

b) While keeping the water level in the open vessel at a suitable height, adjust the alternating hydrostatic pressure in the measuring chamber to zero by varying the frequency. The equivalent height is now equal to g/ω_0^2, where ω_0 is the frequency at which the alternating hydrostatic pressure null occurs. In this method, the water level of the open vessel shall be sufficient to ensure that ω_0 is higher than the upper frequency limit of the calibration range. If the water level is changed by an amount $-\Delta H$ to restore the alternating hydrostatic pressure to a suitable value, the equivalent height at this point shall be obtained using the expression (36).

10.2.4.3 Water level change method

With the water level in the open vessel at an instantaneous height, H_e, and the open vessel vibrating vertically at a frequency ω, measure the open-circuit voltage U_1 of a hydrophone in the measuring chamber. Change the water level of the open vessel by an amount ΔH, then measure the open-circuit voltage of the hydrophone, U_2. With these two measurements, the equivalent height shall then be determined according to the equation:

$$H_e = \frac{g}{\omega^2} + \frac{U_1 \Delta H}{(U_2 - U_1)} \tag{37}$$

NOTE ΔH is positive when the water level rises and is negative when the water level falls [53].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

10.2.4.4 Méthode des deux fréquences

Le récipient ouvert vibrant dans un premier temps à la fréquence ω_1, puis à la fréquence ω_2 (ω_1 et ω_2 doivent être proches l'une de l'autre, différant de moins de 0,6 rad/s), mesurer les tensions en circuit ouvert correspondantes U_1 et U_2 de l'hydrophone dans la chambre fermée. Les hypothèses suivantes doivent être émises.

a) La sensibilité de l'hydrophone est quasiment la même à deux fréquences proches, qui sont bien inférieures à la fréquence de résonance de l'hydrophone.

b) L'hydrophone subira quasiment la même influence de la résonance de Helmholtz du système à deux fréquences rapprochées. Dans ce cas, la hauteur équivalente doit être calculée par l'expression:

$$H_{\mathrm{e}} = \mathrm{g}\frac{\left(U_2 - U_1\right)}{U_2\,\omega_1^2 - U_1\,\omega_2^2} \tag{38}$$

NOTE La méthode de mise à zéro de la pression hydrostatique alternative est la plus précise des trois méthodes. Cependant, dans la mesure où cette méthode nécessite que la fréquence pour le niveau zéro de pression soit au-delà de la fréquence d'étalonnage, le dispositif de vibration fonctionne sur une bande de fréquences plus étendue. La méthode des deux fréquences est la plus convenable. Si l'hypothèse liée est satisfaite, cette méthode est également très précise [53].

10.2.5 Calcul de la sensibilité en pression des hydrophones

La sensibilité en pression M_{p} d'un hydrophone placé dans la chambre de mesure (voir la Figure 3) doit être calculée par:

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{U_0}{p_0} \tag{39}$$

où U_0 est la tension en circuit ouvert de l'hydrophone et p_0 est la pression dans la chambre. Les conditions suivantes doivent être satisfaites, lorsque la sensibilité en pression M_{p} est égale à la sensibilité en champ libre M_{H}:

a) le facteur de diffraction de l'hydrophone est égal à l'unité,

b) l'hydrophone présente une réponse négligeable à la vitesse des particules et au gradient de pression,

c) soit la fréquence d'étalonnage est suffisamment inférieure à la fréquence de résonance la plus basse de l'hydrophone, de sorte que la sensibilité de l'hydrophone est indépendante de l'impédance acoustique, soit l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la chambre est égale à l'impédance acoustique dans un champ libre.

NOTE Ceci est supposé être le cas et M_{H} sera utilisée à la place de M_{p} pour l'étalonnage utilisant l'excitation hydrostatique.

10.3 Mesure de la sensibilité des hydrophones

A l'aide de l'équation (39), la sensibilité M_{H} de chaque hydrophone doit être calculée à partir du rapport de la tension en circuit ouvert et de la pression existant sur l'hydrophone à chaque fréquence.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

10.2.4.4 Two frequencies method

With the open vessel vibrating first at the frequency ω_1 and then at the frequency ω_2 (ω_1 and ω_2 shall be close to each other, differing by less than 0,6 rad/s), measure the corresponding open-circuit voltages U_1 and U_2 of the hydrophone in the closed chamber. The assumption shall be made that.

a) The sensitivity of the hydrophone is almost the same at two close frequencies, which are much lower than the resonance frequency of the hydrophone.
b) The hydrophone will suffer nearly the same influence of the Helmholtz resonance of the system at two closely spaced frequencies. In this case, the equivalent height shall be calculated by the expression:

$$H_{\mathrm{e}} = \mathrm{g}\frac{\left(U_2 - U_1\right)}{U_2\,\omega_1^2 - U_1\,\omega_2^2} \tag{38}$$

NOTE The alternating hydrostatic pressure null method is the most accurate of the three methods. However, as this method requires that the frequency for the pressure null be beyond the calibration frequency range, the vibration device operates over a wider frequency range. The two-frequency method is the most convenient one. If the related assumption is satisfied, this method is also very accurate [53].

10.2.5 Calculation of the pressure sensitivity of hydrophones

The pressure sensitivity M_{p} of a hydrophone placed into the measuring chamber (see Figure 3) shall be calculated by:

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{U_0}{p_0} \tag{39}$$

where U_0 is the open-circuit voltage of the hydrophone and p_0 is the pressure in the chamber. The following conditions shall be met, when the pressure sensitivity M_{p} is equal to the free-field sensitivity M_{H}:

a) the diffraction factor of the hydrophone is unity,
b) the hydrophone has negligible response to particle velocity and pressure gradient,
c) either the frequency of calibration is sufficiently below the lowest resonance frequency of the hydrophone so that the sensitivity of the hydrophone is independent of acoustic impedance, or the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the chamber is equal to the acoustic impedance in a free field.

NOTE This is assumed to be the case and M_{H} will be used in place of M_{p} for calibration using hydrostatic excitation.

10.3 Measurement of the sensitivity of hydrophones

By means of equation (39), the sensitivity M_{H} of each hydrophone shall be calculated from the ratio of the open-circuit voltage and the pressure existing on the hydrophone at each frequency.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La pression p_0 doit être déduite de l'équation (32). Si le système d'étalonnage et le niveau de l'eau du récipient ouvert ne sont pas modifiés, les amplitudes de h_0, ω_r et H_e dans les équations restent constantes et doivent être déterminées à l'avance. L'amplitude de la pression p_0 est également connue à l'avance à chaque fréquence, de sorte que seule la tension en circuit ouvert U_0 de l'hydrophone doit être mesurée pour chaque étalonnage.

NOTE Il convient que l'appareil utilisé pour mesurer la tension de sortie de l'hydrophone ait une impédance électrique d'entrée bien supérieure à celle de l'hydrophone. (Voir 7.3.2). Les appareils utilisés pour la mesure de la tension sont les suivants: voltmètre numérique, oscilloscope numérique et analyseur de signaux.

Etant donné que la hauteur équivalente H_e dépend du niveau d'eau dans le récipient ouvert et de l'emplacement du tube flexible, la valeur de la hauteur équivalente H_e doit être déterminée à chaque session d'étalonnage, à l'aide de la méthode des deux fréquences.

10.4 Conception du système de vibration

La conception du système de vibration doit prendre en compte les éléments suivants.

a) Etant donné que la variation du niveau de l'eau h est liée à la pression équivalente p, son amplitude h_0 doit être suffisamment élevée pour fournir une pression équivalente suffisamment élevée, afin de garantir un rapport suffisamment grand du signal mesuré au bruit. Cependant, pour que les dispositifs mobiles continuent à osciller régulièrement à la fréquence limite supérieure du système, l'amplitude h_0 ne doit pas être trop élevée.

NOTE 1 En pratique, lorsque la fréquence d'étalonnage est inférieure à 1 Hz ou 2 Hz, une amplitude adaptée au déplacement de vibration peut aller jusqu'à 20 mm ou 5 mm, respectivement.

b) Pour convertir le mouvement rotatif en mouvement harmonique simple linéaire et vertical, un mécanisme particulier doit être conçu.

NOTE 2 Un type de mécanisme de ce type implique la fixation d'une broche excentriquement sur un disque entraîné par un moteur. La broche glisse dans une rainure de culasse; la culasse et la tige de support sont contraintes à se déplacer dans l'axe vertical. Lorsque le disque tourne, la culasse et la tige se déplacent vers le haut et vers le bas de façon sinusoïdale. Le rayon de l'emplacement de la broche est égal à l'amplitude du déplacement h_0. La fréquence du mouvement linéaire peut être exprimée comme suit:

$$f = \nu / 360 \tag{40}$$

où ν est la vitesse de rotation de l'entraînement par moteur, en degrés par seconde.

c) Lors de la conception des pièces du système se composant de la chambre de mesure, du tuyau souple et du récipient ouvert, la fréquence de résonance de Helmholtz ω_r doit être aussi éloignée que possible de la fréquence d'étalonnage ω. La condition suivante doit être satisfaite:

$$\omega_r \geq 20\omega \tag{41}$$

de sorte que l'on obtienne alors:

$$|K_0| \approx 1 \tag{42}$$

d) Le système d'étalonnage doit être conçu et installé de sorte que l'influence de toute vibration parasite du dispositif mobile sur le récipient ouvert soit réduite. Toutes les précautions nécessaires doivent être prises, afin d'éviter le couplage direct de toute vibration.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The pressure p_0 shall be derived from the equation (32). If the calibration system and the water level of the open vessel are kept unchanged, the magnitudes of h_0, ω_r and H_e in the equations remain constant and shall be determined in advance. The magnitude of the pressure p_0 is also known in advance at each frequency so that only the open-circuit voltage U_0 of the hydrophone shall be measured for each calibration.

NOTE The instrument used to measure the output voltage of the hydrophone should have an input electrical impedance much higher than that of the hydrophone. (See 7.3.2). Instruments used for measuring voltage include digital voltmeter, digital oscilloscope and signal analyser.

Since the equivalent height H_e depends on the water level in the open vessel and the location of the flexible tube, the value of the equivalent height H_e shall be determined at each calibration session using the two frequencies method.

10.4 Design of vibration system

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

a) As the displacement of the water level h is related to the equivalent pressure p, its amplitude h_0 shall be large enough to produce a sufficiently high equivalent pressure to ensure adequate excess of the measured signal over the noise. However, to keep the moving devices oscillating smoothly at the upper frequency limit of the system, the amplitude h_0 shall not be too large.

   NOTE 1 In practice, when the calibration frequency is lower than 1 Hz or 2 Hz, a suitable amplitude for vibration displacement may be up to 20 mm or 5 mm, respectively.

b) For converting rotary motion to vertical linear simple harmonic motion, a special mechanism shall be designed.

   NOTE 2 One type of such a mechanism involves fixing a pin eccentrically on a motor-drive disk. The pin slides in a groove of a yoke; the yoke and supporting rod are constrained to move in a vertical direction. As the disk rotates, the yoke and rod move up and down sinusoidally. The radius of the pin position is equal to the amplitude of displacement h_0. The frequency of linear motion can be expressed as:

$$f = v / 360 \tag{40}$$

   where v is the rotational velocity of the motor drive in degrees per second.

c) In the design of the parts of the system consisting of the measuring chamber, the soft pipe and the open vessel, the Helmholtz resonance frequency ω_r shall be as far away from the calibration frequency ω as possible. The following condition shall be satisfied:

$$\omega_r \geq 20\omega \tag{41}$$

   so that, then:

$$|K_0| \approx 1 \tag{42}$$

d) The calibration system shall be designed and installed in such a way that the influence of any stray vibration of the moving device on the open vessel is minimized. All necessary precautions shall be taken to avoid the direct coupling of any vibration.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

e) Afin d'assurer un mouvement uniforme de l'eau, l'accélération du récipient ouvert doit être inférieure à l'accélération due à la pesanteur. Cette condition doit être exprimée comme suit:

$$\omega_0^2 \, h_0 << \mathrm{g} \tag{43}$$

NOTE 3 Le disque d'entraînement peut être entraîné de diverses façons. Afin de contrôler la vitesse de rotation v précisément avec un ordinateur, des moteurs pas-à-pas sont généralement utilisés. De plus, afin d'éviter le point de résonance du dispositif mobile à une fréquence basse et afin de maintenir le déplacement régulier du récipient ouvert dans l'axe vertical, il est recommandé d'utiliser des moteurs pas-à-pas doubles, entraînés en mode différentiel.

10.5 Incertitude

L'incertitude dans la méthode d'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité de l'hydrophone.

NOTE 1 Les principales sources d'incertitude pour cette méthode proviennent de l'amplitude du déplacement du récipient ouvert h_0, de la fréquence de vibration ω, du coefficient de majoration $\left|K_0\right|$, de la tension en circuit ouvert de l'hydrophone U_0 et de la hauteur équivalente H_e.

NOTE 2 Il est envisagé que l'incertitude étendue globale de l'étalonnage puisse être inférieure à 0,3 dB (niveaux de confiance de 95 %) en effectuant l'essai minutieusement.

10.6 Méthode alternative pour l'excitation hydrostatique

Une autre approche consiste à faire varier la pression hydrostatique en modifiant la profondeur d'immersion de l'hydrophone avec un mouvement harmonique simple. Dans ce cas, l'amplitude de la pression alternative p_0 doit être donnée par l'équation (31) et la sensibilité en pression M_p doit être calculée à partir de l'équation (39). Lorsque les conditions de 10.2.5 sont satisfaites, la sensibilité en pression est égale à la sensibilité en champ libre M_H.

NOTE Cette méthode d'excitation hydrostatique introduit des sources de pression dynamique qui contribuent à l'incertitude de mesure. La première source est l'écoulement hydrodynamique autour de l'hydrophone. Ceci dépend de la forme de l'hydrophone. La deuxième source provient des effets inertiels du milieu. Elle peut être réduite par une orientation adéquate de l'hydrophone, afin de réduire le déplacement de l'eau près de la face active. Par exemple, les hydrophones avec des faces actives planes peuvent être orientés avec la face de l'hydrophone dans un plan vertical. La troisième source provient des effets inertiels à l'intérieur de l'hydrophone. Ceci peut souvent être réduit par l'orientation, bien que l'orientation optimale puisse ne pas être la même que celle qui réduit les effets inertiels du milieu. La quatrième source de pression dynamique indésirable est la turbulence. Ceci peut être réduit en lissant autant que possible toutes les fixations. Il est également possible que le mouvement harmonique de l'hydrophone puisse exciter une oscillation de résonance dans la chambre d'étalonnage. Ces sources supplémentaires d'incertitude tendent à augmenter avec la fréquence et limitent la bande de fréquences supérieures pour cette technique. Pour les fréquences jusqu'à 2 Hz, il est envisagé que l'incertitude étendue globale de l'étalonnage puisse être inférieure à 0,5 dB (niveaux de confiance de 95 %) en effectuant l'essai minutieusement [1], [54].

11 Etalonnage par compensation piézo-électrique

11.1 Principe

Un hydrophone est étalonné sans transducteur étalon, dans une chambre fermée remplie d'eau, à des fréquences pour lesquelles la longueur d'onde est suffisamment plus élevée que la plus grande dimension de la chambre. Une méthode d'étalonnage d'un hydrophone dans une petite chambre fermée est utilisée, sans transducteur étalon, dans la bande de fréquences de 1,0 Hz à 5 kHz, [55] à [58].

NOTE La méthode de compensation piézo-électrique est utilisée lorsque les hydrophones doivent être étalonnés sans mise à disposition d'un volume d'eau important.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

e) To ensure uniform motion of the water, the acceleration of the open vessel shall be less than the acceleration due to gravity. This condition shall be expressed as:

$$\omega_0^2 h_0 << \mathrm{g} \tag{43}$$

NOTE 3 The drive disk can be driven in various ways. In order to control the rotational velocity v accurately with a computer, stepper motors are usually used. Moreover, to avoid the resonance point of the moving device at low frequency and to keep the open vessel moving smoothly in the vertical direction, it is recommended that dual stepper motors be used driven in a differential mode.

10.5 Uncertainty

The uncertainty in the calibration method shall be determined and stated with the value for the hydrophone sensitivity.

NOTE 1 The main sources of uncertainty for this method come from the amplitude of the displacement of the open vessel h_0, the vibration frequency ω, the increasing factor $\left|K_0\right|$, the open circuit voltage of the hydrophone U_0 and the equivalent height H_e.

NOTE 2 It is expected that the overall expanded uncertainty of the calibration can be less than 0,3 dB (95 % confidence levels) with careful practice.

10.6 Alternative method for hydrostatic excitation

As an alternative approach, the hydrostatic pressure may be varied by changing the depth of the hydrophone with simple harmonic motion. In this case the alternating pressure amplitude p_0 shall be given by equation (31) and the pressure sensitivity M_p shall be calculated from equation (39). When the conditions of 10.2.5 are met, the pressure sensitivity is equal to the free-field sensitivity M_H.

NOTE This method of hydrostatic excitation introduces sources of dynamic pressure that contribute to measurement uncertainty. The first source is the hydrodynamic flow around the hydrophone. This is a function of the hydrophone shape. The second source arises from inertial effects of the medium. It can be minimized by proper orientation of the hydrophone to reduce the displacement of water near the active face. For example, hydrophones with planar active faces can be oriented with the hydrophone face in a vertical plane. The third source arises from inertial effects within the hydrophone. This can often be minimized by orientation, although the optimum orientation might not be the same one that minimizes the inertial effects of the medium. The fourth source of unwanted dynamic pressure is turbulence. This can be minimized by making all fixtures as streamlined as possible. There is also the possibility that the harmonic motion of the hydrophone may excite a slosh resonance in the calibration chamber. These additional sources of uncertainty tend to increase with frequency and limit the upper frequency range for this technique. For frequencies up to 2 Hz, it is expected that the overall expanded uncertainty of the calibration can be less than 0,5 dB (95 % confidence levels) with careful practice [1], [54].

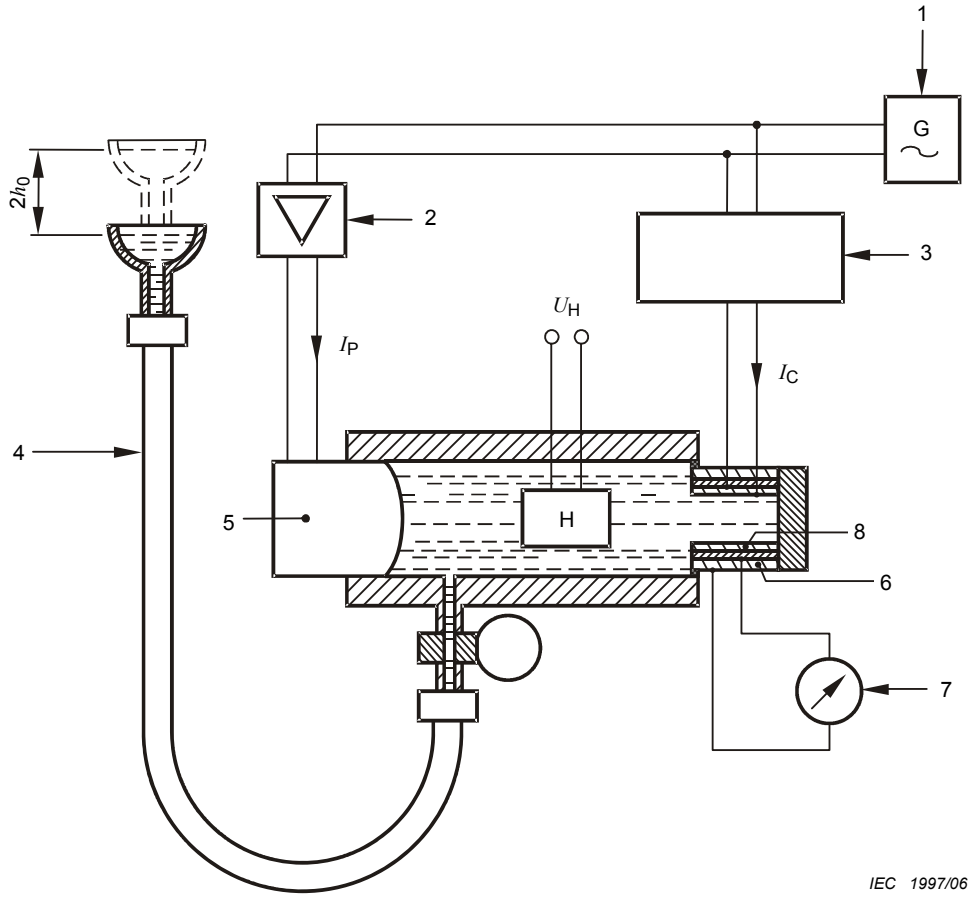
11 Calibration by piezoelectric compensation

11.1 Principle

A hydrophone is calibrated without a standard transducer, in a closed water-filled chamber, at frequencies at which the wavelength is sufficiently larger than the largest dimension of the chamber. A method of calibration of a hydrophone in a small closed chamber, without a standard transducer is used, in the frequency range from 1,0 Hz to 5 kHz [55] to [58].

NOTE The method of piezoelectric compensation is used when hydrophones have to be calibrated without the availability of a large water volume.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

1 Générateur de signaux
2 Amplificateur de puissance
3 Réglage phase et amplitude
4 Colonne d'eau
5 Projecteur source
6 Capteur de déplacement du transducteur d'équilibre
7 Indicateur de zéro
8 Capsule excitatrice du transducteur d'équilibre

Figure 4 – Schéma du système de mesure

11.2 Procédure

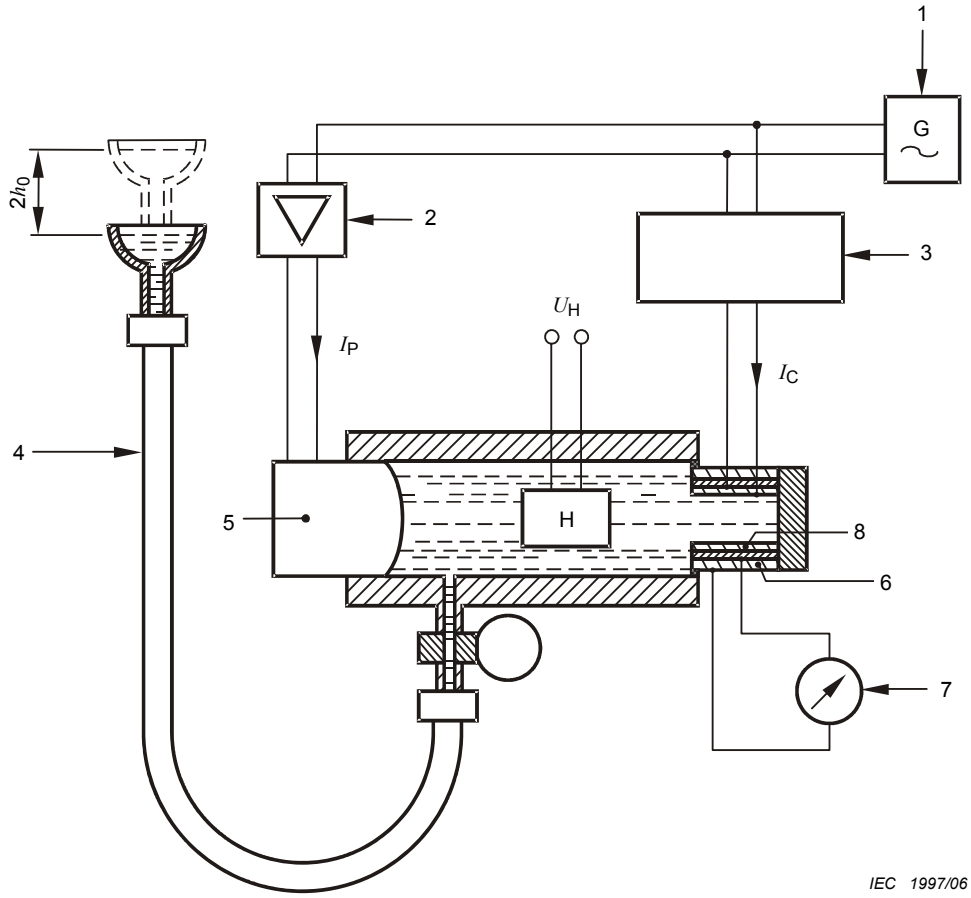
Pendant son étalonnage, placer l'hydrophone dans une cuve fermée et remplie d'eau, équipée d'un projecteur source et d'un transducteur d'équilibre piézo-électrique (voir la Figure 4). Mesurer l'amplitude de la pression alternative produite par le projecteur source dans la cuve, à l'aide du transducteur d'équilibre.

Remplir le petit espace annulaire entre les capsules d'une matière de couplage élastique.

NOTE 1 Le transducteur d'équilibre se compose de deux capsules cylindriques coaxiales en céramique piézo-électrique. La capsule intérieure est le transducteur excitateur, la capsule extérieure est le capteur de déplacement.

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

1 Signal generator
2 Power amplifier
3 Phase and amplitude controls
4 Water column
5 Source projector
6 Displacement sensor of the null transducer
7 Null indicator
8 Driving shell of the null transducer

Figure 4 – Schematic drawing of the measuring system

11.2 Procedure

While being calibrated, place the hydrophone inside a closed, water-filled tank, equipped with a source projector and a piezoelectric null transducer (see Figure 4). Measure the magnitude of the alternating pressure produced by the source projector in the tank using the null transducer.

Fill the small annular gap between the shells with an elastic coupling substance.

NOTE 1 The null transducer consists of two coaxially mounted piezoelectric ceramic cylindrical shells. The inner shell acts as driving transducer, while the outer shell serves as displacement sensor.

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Placer l'hydrophone à étalonner près du centre géométrique du transducteur d'équilibre. Pour les fréquences supérieures à 1 kHz, la chambre d'étalonnage doit être conforme à 11.3.2.

Lorsque les influences simultanées du projecteur source et de la capsule excitatrice du transducteur d'équilibre se neutralisent, le déplacement de la capsule extérieure est égal à zéro; la pression acoustique au voisinage du transducteur d'équilibre doit alors être égale à:

$$p = K(d_{\mathrm{jk}}, E, r)U_{\mathrm{c}} \tag{44}$$

où

$K(d_{\mathrm{jk}}, E, r)$ est une constante caractéristique du transducteur d'équilibre piézo-électrique;

d_{jk} est le module piézo-électrique du matériau de la capsule;

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

r est le rayon moyen de l'enveloppe du transducteur d'excitation;

U_{c} est la tension de compensation à la fréquence f.

La constante caractéristique $K(d_{\mathrm{jk}}, E, r) = p/U_{\mathrm{c}}$ est généralement indépendante de la fréquence. Elle doit être déterminée expérimentalement en faisant varier harmoniquement le niveau de l'eau au-dessus du transducteur d'équilibre d'une amplitude h_0 et en compensant la déformation résultante du transducteur d'équilibre au moyen d'une tension de compensation d'une amplitude ΔU_{c} appliquée au projecteur d'équilibre (voir la Figure 4). Cette tension de compensation doit avoir la même fréquence que le mouvement du niveau de l'eau. Elle doit être dérivée soit à partir de l'oscillateur qui commande la variation du niveau de l'eau, soit à partir d'un capteur de pression qui transforme la variation harmonique du niveau de l'eau en une tension alternative.

NOTE 2 Pour cette opération, la cavité de la cuve de mesure est reliée par un tube flexible à un récipient ouvert, fixé sur un pot vibrant, communiquant des oscillations sinusoïdales verticales d'une amplitude connue. Il convient que la fréquence vibratoire soit assez basse (0,3 Hz) pour que les forces d'inertie apparaissant dans le liquide vibrant soient négligeables.

La phase et l'amplitude ΔU_{c} de la tension de compensation doivent être ajustées jusqu'à ce que le déplacement du transducteur d'équilibre soit égal à zéro.

$$\Delta p = \rho \mathrm{g}\ h_0$$

Ainsi:

$$K(d_{\mathrm{jk}}, E, r) = \frac{\Delta p}{\Delta U_{\mathrm{c}}} = \frac{\rho \mathrm{g}\ h_0}{\Delta U_{\mathrm{c}}} \tag{45}$$

où

Δp est l'amplitude vibratoire de la pression hydrostatique;

h_0 est l'amplitude vibratoire du niveau d'eau;

ΔU_{c} est l'amplitude de la tension de compensation.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Place the hydrophone to be calibrated close to the geometric centre of the null transducer. For frequencies higher than 1 kHz, the calibration chamber shall be in accordance with 11.3.2.

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

$$p = K(d_{jk}, E, r)U_c \tag{44}$$

where

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

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

E is the Young's modulus of the shell material;

r is the mean radius of driving transducer shell;

U_c is the compensation voltage at the frequency f.

The characteristic constant $K(d_{jk}, E, r) = p/U_c$ is generally independent of the frequency. It shall be determined experimentally by harmonically changing the water level over the null transducer with amplitude h_0 and compensating the resulting deformation of the null transducer by a compensation voltage with an amplitude ΔU_c at the null projector (see Figure 4). This compensation voltage shall have the same frequency as the oscillation of the water level. It shall be derived either from the oscillator that drives the variation of the water level, or from a pressure sensor that transforms the harmonic displacement of the water level into an alternating voltage.

NOTE 2 For this purpose, the cavity of the measuring tank is connected by means of a flexible tube with an open vessel, mounted on a shaker, producing vertical sinusoidal oscillations with a known amplitude. The oscillation frequency should be low enough (0,3 Hz) to permit neglect of the inertial forces arising in the vibrating liquid.

The amplitude ΔU_c of the compensation voltage and its phase shall be adjusted until the displacement of the null transducer is zero.

Then:

$$\Delta p = \rho g\, h_0$$
$$K(d_{jk}, E, r) = \frac{\Delta p}{\Delta U_c} = \frac{\rho g\, h_0}{\Delta U_c} \tag{45}$$

where

Δp is the amplitude of the hydrostatic pressure oscillation;

h_0 is the amplitude of the water level oscillation;

ΔU_c is the amplitude of the compensation voltage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La sensibilité en pression M_{p} de l'hydrophone H en fonction de la tension en circuit ouvert est égale à:

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{U}{p} = \frac{U}{U_{\mathrm{c}}} \cdot \frac{\Delta U_{\mathrm{c}}}{\rho g h_0} \tag{46}$$

où U est la tension de sortie en circuit ouvert de l'hydrophone H à la pression p, qui dépend de la fréquence. Lorsque les conditions suivantes sont satisfaites, la sensibilité en pression M_{p} est égale à la sensibilité en champ libre M_{H}:

a) le facteur de diffraction de l'hydrophone est égal à l'unité,
b) l'hydrophone présente une réponse négligeable à la vitesse des particules et au gradient de pression,
c) soit la fréquence d'étalonnage est suffisamment inférieure à la fréquence de résonance la plus basse de l'hydrophone, de sorte que la sensibilité de l'hydrophone est indépendante de l'impédance acoustique, soit l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la chambre est égale à l'impédance acoustique dans un champ libre.

Ceci est supposé être le cas et M_{H} sera utilisée à la place de M_{p} pour l'étalonnage utilisant une compensation piézo-électrique.

11.3 Conception de la chambre d'étalonnage

11.3.1 Chambre pour basses fréquences

La chambre pour basses fréquences doit être construite à partir d'une section de tuyau muni de couvercles sur les deux extrémités. Un projecteur source et un transducteur d'équilibre doivent être montés sur les couvercles (voir la Figure 4). Les centres géométriques des transducteurs doivent être situés dans le même plan horizontal.

Le projecteur source doit fournir un niveau de pression suffisamment élevé pour garantir un rapport signal sur bruit suffisant.

Les précautions suivantes doivent être prises.

a) La cuve doit être conçue de telle sorte que l'air emprisonné puisse être aisément évacué.
b) L'élasticité acoustique des parois de la cuve doit être inférieure à celle du volume d'eau.
c) Une cale et rainure de cale ou une garniture métallique doit être utilisée de préférence à des joints ayant une plus grande élasticité.
d) La conception de la cuve et le montage du projecteur source doivent être tels que les modes de vibration en flexion des parois de la cuve soient excités le moins possible.
e) Toutes les mesures nécessaires doivent être prises pour éviter l'influence de toute vibration de la cuve sur le transducteur d'équilibre et l'hydrophone.

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The pressure sensitivity M_{p} of the hydrophone H in terms of the open-circuit voltage is equal to:

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{U}{p} = \frac{U}{U_{\mathrm{c}}} \cdot \frac{\Delta U_{\mathrm{c}}}{\rho g h_0} \tag{46}$$

where U is the open circuit output voltage of the hydrophone H at a pressure p, dependent on the frequency. When the following conditions are met, the pressure sensitivity M_{p} is equal to the free-field sensitivity M_{H}:

a) the diffraction factor of the hydrophone is unity,
b) the hydrophone has negligible response to particle velocity and pressure gradient,
c) either the frequency of calibration is sufficiently below the lowest resonance frequency of the hydrophone so that the sensitivity of the hydrophone is independent of acoustic impedance or the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the chamber is equal to the acoustic impedance in a free field.

This is assumed to be the case and M_{H} will be used in place of M_{p} for calibration using piezoelectric compensation.

11.3 Design of the calibration chamber

11.3.1 Low frequency chamber

The low-frequency chamber shall be constructed from a section of pipe fitted with lids on both ends. A source projector and null transducer shall be mounted on the lids (see Figure 4). The geometric centres of the transducers shall be located in the same horizontal plane.

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

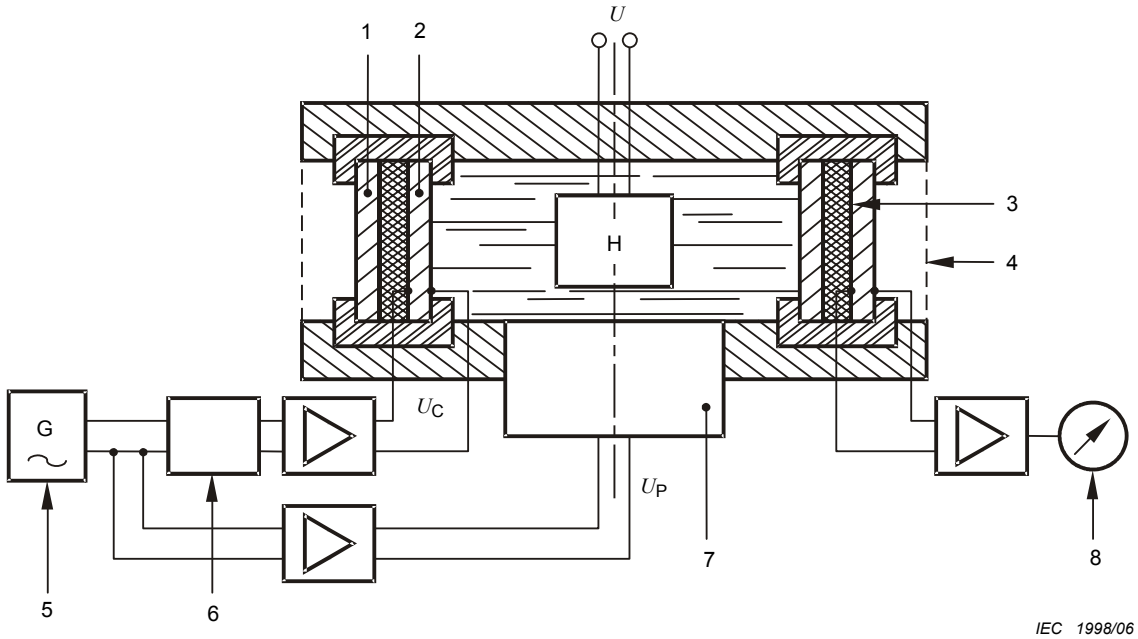
The following precautions shall be taken.

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

11.3.2 Chambre pour hautes fréquences



Légende

1 Capteur de déplacement du transducteur d'équilibre
2 Capsule excitatrice du transducteur d'équilibre
3 Matière souple de remplissage
4 Blindage
5 Générateur de signaux
6 Réglage phase et amplitude
7 Projecteur source
8 Indicateur de zéro

Figure 5 – Schéma de la chambre pour hautes fréquences

La chambre pour hautes fréquences doit être telle que représenté à la Figure 5. Les dimensions linéaires doivent être réduites le plus possible afin d'augmenter la fréquence limite supérieure au-delà de 1 kHz.

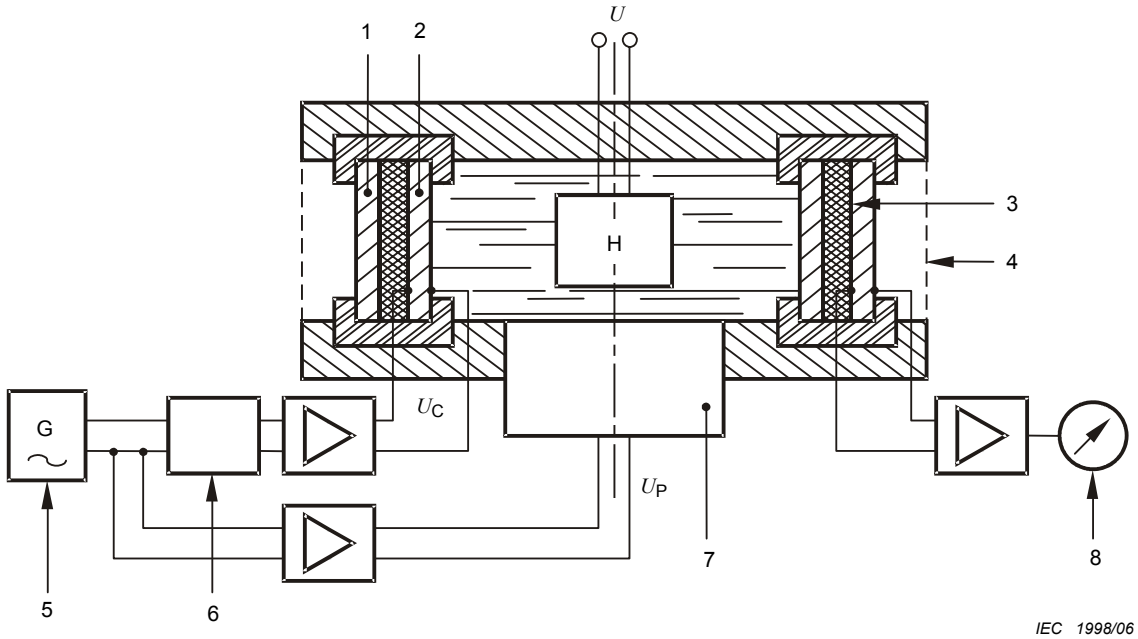
Le transducteur d'équilibre piézo-électrique doit se composer de deux capsules concentriques cylindriques en céramique piézo-électrique pressées entre deux rebords massifs. L'espace entre les deux cylindres doit être rempli d'un matériau élastomère non conducteur. Le transducteur d'équilibre doit former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

Placer l'hydrophone sur le couvercle de la chambre. Les mêmes précautions doivent être prises dans la conception de la chambre pour hautes fréquences que celles spécifiées en 11.3.1 pour la chambre pour basses fréquences. En outre, des précautions doivent être prises pour diminuer l'influence de la déformation longitudinale des capsules piézo-électriques, produite par l'effet piézo-électrique transversal, sur la tension de sortie du capteur de déformation. Le transducteur d'équilibre et ses connexions électriques doivent être soigneusement blindés.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

11.3.2 High frequency chamber



Key

1 Displacement sensor of the null transducer
2 Driving shell of the null transducer
3 Elastic filling substance
4 Shield
5 Signal generator
6 Phase and amplitude controls
7 Source projector
8 Null indicator

Figure 5 – Diagram of the chamber for high-frequency

The high frequency chamber shall be as shown in Figure 5. The linear dimensions shall be made as small as possible in order to increase the upper frequency limit to above 1 kHz.

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

Mount the hydrophone on the lid of the chamber. The same precautions shall be taken in the design of the high frequency chamber as those specified in 11.3.1 for the low frequency chamber. Moreover, precautions shall be taken to reduce the influence of the longitudinal deformation of the piezoelectric shells, caused by the transverse piezoelectric effect, on the output voltage of the deformation sensor. The null transducer and its electrical connections shall be adequately shielded.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

11.4 Limites pratiques de la méthode de compensation piézo-électrique

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

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

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

NOTE 1 Cette méthode, moyennant une conception judicieuse de la chambre, permet de couvrir une bande de fréquences de 1 Hz à 5 kHz.

NOTE 2 Si l'hydrophone est symétrique, il convient qu'il soit positionné dans la chambre de telle sorte que les plans de symétrie acoustique du transducteur d'équilibre et de l'hydrophone coïncident. De cette manière, l'influence des ondes stationnaires sur le résultat d'étalonnage est minimisée et la bande de fréquences peut être étendue. Voir [55].

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

NOTE 4 En pratique, le plan de symétrie acoustique du transducteur d'équilibre coïncide avec le plan de symétrie géométrique. Cela est valable également pour un simple hydrophone omnidirectionnel si les surfaces de la face active des deux côtés du plan sont égales, ainsi que les sensibilités localisées de ces surfaces.

11.5 Incertitude

L'incertitude dans la méthode d'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité de l'hydrophone.

NOTE 1 Si les conditions indiquées en 11.3 sont satisfaites, l'étalonnage par la méthode de compensation piézo-électrique est équivalent à un étalonnage en champ libre, avec une incertitude étendue globale possible inférieure à 1 dB (niveaux de confiance de 95 %).

NOTE 2 Jusqu'aux fréquences d'environ le cinquième de la fréquence de résonance la plus basse de la chambre, l'incertitude étendue globale de l'étalonnage peut être inférieure à 0,3 dB (niveaux de confiance de 95 %).

12 Etalonnage par réciprocité du coupleur acoustique

12.1 Principe

L'étalonnage primaire des hydrophones dans un coupleur utilisant le principe de réciprocité est entrepris. Une méthode d'étalonnage absolu des hydrophones étalons de laboratoire est utilisée, avec la précision la plus élevée pouvant être obtenue. La bande de fréquences de l'étalonnage est généralement restreinte à des fréquences comprises entre 0,1 Hz et 5 kHz [44], [59] à [61].

12.2 Procédure

Un transducteur réciproque, une source sonore électroacoustique linéaire, et un hydrophone à monter dans un coupleur à remplissage de fluide doivent être utilisés. La sensibilité en pression acoustique de l'hydrophone doit être déterminée.

En utilisant le transducteur réciproque comme projecteur et l'hydrophone comme récepteur, mesurer le module de l'impédance électrique de transfert à un certain nombre de fréquences dans la bande de fréquences concernée.

NOTE Voir 7.5.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

11.4 Practical limitations of the piezoelectric compensation method

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

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

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

NOTE 1 By proper design of the chamber, a frequency range from 1 Hz to 5 kHz can be covered by this method.

NOTE 2 If the hydrophone is symmetrical, it should be so arranged in the chamber that the planes of the acoustic symmetry of the null transducer and of the hydrophone coincide. In this way, the influence of standing waves on the calibration result is minimized and the frequency range can be extended. See [55].

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

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

11.5 Uncertainty

The uncertainty in the calibration method shall be determined and stated with the value for the hydrophone sensitivity.

NOTE 1 If the conditions given in 11.3 are satisfied, the calibration by the piezoelectric compensation method is equivalent to a free-field calibration, with a possible overall expanded uncertainty of less than 1 dB (95 % confidence levels).

NOTE 2 At frequencies up to about one-fifth of the lowest resonance frequency of the chamber, the overall expanded uncertainty of the calibration can be less than 0,3 dB (95 % confidence levels).

12 Acoustic coupler reciprocity calibration

12.1 Principle

The primary calibration of hydrophones in a coupler using the reciprocity principle is undertaken. A method of absolute calibration of laboratory standard hydrophones with the highest obtainable accuracy is used. The frequency range of calibration of is generally restricted to frequencies between 0,1 Hz and 5 kHz [44], [59] to [61].

12.2 Procedure

A reciprocal transducer, a linear electro-acoustic sound source, and a hydrophone to be mounted in a fluid-filled coupler shall be used. The acoustical pressure sensitivity of the hydrophone shall be determined.

Using the reciprocal transducer as a projector and the hydrophone as a receiver, measure the magnitude of the electrical transfer impedance at a number of frequencies throughout the frequency range of interest.

NOTE See 7.5.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En utilisant la source sonore comme projecteur et, en alternance, le transducteur réciproque et l'hydrophone comme récepteurs, mesurer les impédances électriques de transfert au même ensemble de fréquences que les mesures ci-dessus.

A partir des trois impédances électriques de transfert mesurées à chaque fréquence, la sensibilité en pression acoustique M_{p} de l'hydrophone doit être calculée. Les conditions suivantes doivent être satisfaites, de sorte que la sensibilité en pression M_{p} soit égale à la sensibilité en champ libre M_{H} :

a) le facteur de diffraction de l'hydrophone est égal à l'unité;
b) l'hydrophone présente une réponse négligeable à la vitesse des particules et au gradient de pression;
c) soit la fréquence d'étalonnage est suffisamment inférieure à la fréquence de résonance la plus basse de l'hydrophone, de sorte que la sensibilité de l'hydrophone est indépendante de l'impédance acoustique, soit l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la chambre est égale à l'impédance acoustique dans un champ libre.

Ceci est supposé être le cas et M_{H} doit être utilisée à la place de M_{p} pour l'étalonnage par réciprocité du coupleur acoustique.

12.3 Théorie

La disposition des transducteurs dans un coupleur pour l'étalonnage par réciprocité doit être conforme à la Figure 6.

La théorie relative à l'étalonnage par réciprocité du coupleur acoustique doit suivre celle relative à l'étalonnage par réciprocité en champ libre, avec les substitutions suivantes:

a) Identifier la grandeur S_{T} avec la réponse à l'émission en pression dans une chambre de petites dimensions à la place de la réponse en champ libre.
b) Remplacer le paramètre de réciprocité pour une chambre de petites dimensions ωC_{t} par le paramètre de réciprocité en champ libre à un mètre $2/\rho f$, où C_{t} est l'élasticité acoustique totale du coupleur.
c) Fixer $d = 1\,\mathrm{m}$ dans toutes les équations en champ libre.

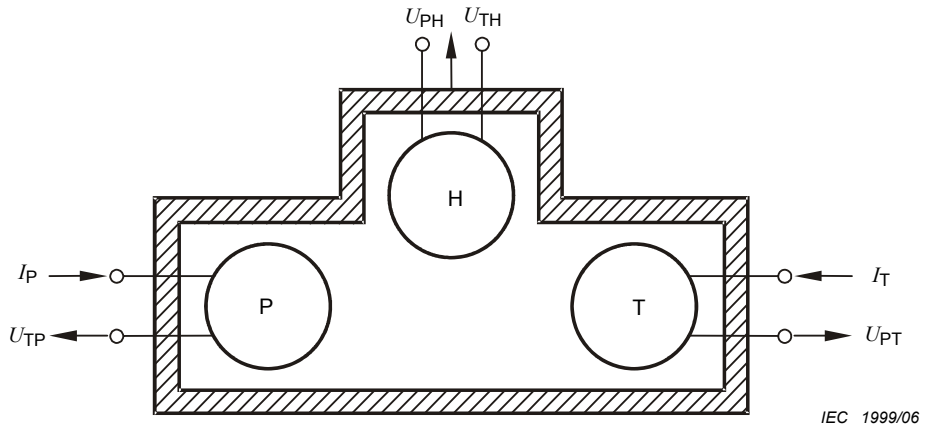


Figure 6 – Coupleur de réciprocité avec trois transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

From the three electrical transfer impedances measured at each frequency, the acoustical pressure sensitivity M_{p} of the hydrophone shall be calculated. The following conditions shall be met, so that the pressure sensitivity M_{p} is equal to the free-field sensitivity M_{H}:

a) the diffraction factor of the hydrophone is unity;
b) the hydrophone has negligible response to particle velocity and pressure gradient;
c) either the frequency of calibration is sufficiently below the lowest resonance frequency of the hydrophone so that the sensitivity of the hydrophone is independent of acoustic impedance or the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the chamber is equal to the acoustic impedance in a free field.

This is assumed to be the case and M_{H} shall be used in place of M_{p} for acoustical reciprocity coupler calibration.

12.3 Theory

The arrangement of transducers in a coupler for reciprocity calibration shall be in accordance with Figure 6.

The theory for acoustical coupler reciprocity calibration shall follow that for free-field reciprocity calibration with the following substitutions:

a) Identify the quantity S_{T} with the small chamber transmitting response to pressure instead of the free-field response.
b) Substitute the reciprocity parameter for a small chamber ωC_{t} for the free-field reciprocity parameter at one metre $2/\rho f$ where C_{t} is the total acoustical compliance of the coupler.
c) Set $d = 1$ m in all free-field equations.

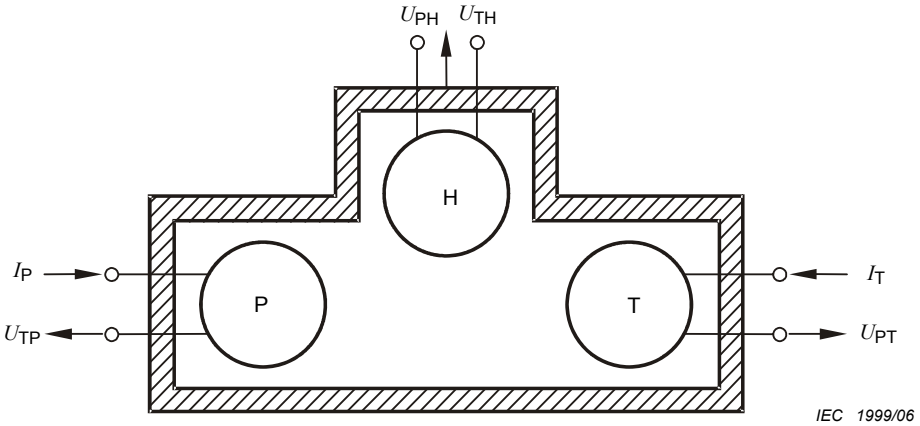


Figure 6 – Reciprocity coupler with three transducers; a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

La valeur de M_H^2 doit être calculée à partir de l'équation suivante:

$$M_H^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}||Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (47)$$

où $|Z_{PH}|$, $|Z_{TH}|$, et $|Z_{PT}|$ sont les modules des impédances électriques de transfert, tel que spécifié en 8.2.

12.4 Elasticité acoustique

Si le coupleur et les transducteurs dans le coupleur sont rigides et si le volume V_f du fluide dans le coupleur est connu précisément, l'élasticité acoustique doit alors être calculée par:

$$C_t = V_f / \rho_f c_f^2 \quad (48)$$

où ρ_f est la densité du fluide et c_f est la vitesse du son dans le fluide.

Pour obtenir la précision la plus élevée, l'élasticité des parois du coupleur et les transducteurs dans le coupleur doivent être pris en compte. Les joints élastiques doivent être conçus de façon à ce qu'ils ne soient pas exposés au champ acoustique dans le coupleur. L'élasticité des éléments actifs des transducteurs électroacoustiques dans le coupleur doit être calculée à partir des propriétés publiées des matériaux, ou elle doit être mesurée dans le coupleur à l'aide de la méthode mise au point par McKinney *et al.*, voir [62].

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

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

12.5 Limite de haute fréquence

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

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

12.6 Limite de basse fréquence

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

NOTE Il n'y a pas de limite de basse fréquence théorique. En pratique, les problèmes électriques liés à l'entraînement d'un projecteur piézo-électrique de petite taille avec une impédance électrique très élevée signifient toutefois qu'il convient que la limite la plus basse en pratique soit de 0,1 Hz pour un coupleur conçu pour une utilisation jusqu'à quelques centaines de hertz. Un coupleur plus petit destiné à être utilisé à une fréquence plus élevée a des limites de basse fréquence qui sont proportionnellement plus élevées.

12.7 Mesure

La mesure doit être effectuée conformément à 7.3, 7.4, 8.6.5, 8.6.6 et 8.6.7.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

M_H^2 shall be calculated from the following equation:

$$M_H^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}||Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (47)$$

where $|Z_{PH}|$, $|Z_{TH}|$, and $|Z_{PT}|$ are the magnitudes of the electrical transfer impedances as specified in 8.2.

12.4 Acoustic compliance

If the coupler and the transducers in the coupler are rigid and the volume V_f of the fluid in the coupler is accurately known, then the acoustical compliance shall be calculated by:

$$C_t = V_f / \rho_f c_f^2 \quad (48)$$

where ρ_f is the density of the fluid and c_f is the speed of sound in the fluid.

For the highest accuracy, the compliances of the coupler walls and the transducers in the coupler shall be taken into account. Resilient gaskets shall be designed in such a way that they are not exposed to the acoustical field in the coupler. The compliances of the active elements of the electro-acoustic transducers in the coupler shall either be calculated from published material properties or they shall be measured in the coupler using the method developed by McKinney et. al., see [62].

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

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

12.5 High-frequency limit

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

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

12.6 Low-frequency limit

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

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

12.7 Measurement

Measurement shall be carried out in accordance with 7.3, 7.4, 8.6.5, 8.6.6 and 8.6.7.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

12.8 Incertitude

Les conditions de réciprocité, de linéarité et de limite de haute fréquence doivent être satisfaites, comme spécifié en 8.6.6, 8.6.7, et 12.5 et, à condition que l'équation (47) soit valable, l'incertitude étendue globale (niveaux de confiance de 95 %) de l'étalonnage doit être inférieure à 1 dB.

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

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

NOTE 3 Si un hydrophone possède un préamplificateur, il est habituel de placer uniquement l'élément actif de l'hydrophone dans le coupleur, afin de conserver un coupleur de petites dimensions. Si le revêtement du préamplificateur de l'hydrophone diffuse des sons, la sensibilité en champ libre de l'hydrophone différera alors de la sensibilité en pression de l'hydrophone. Ceci est l'une des raisons pour lesquelles le facteur de diffraction peut différer de l'unité.

12.9 Limites

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

NOTE Les hydrophones qui peuvent être étalonnés dans le coupleur de réciprocité doivent pouvoir être montés dans un coupleur, de façon à ce qu'ils forment une limite acoustique stricte à l'intérieur du coupleur ou leur contribution à l'élasticité du coupleur doit être connue. Ils doivent également être conçus de façon à ce que le volume intérieur du coupleur soit connu lorsqu'ils sont montés dans le coupleur. Peu d'hydrophones satisfont à ces restrictions. Afin d'étalonner un ensemble plus général d'hydrophones, il est nécessaire d'étendre le processus par l'utilisation des techniques décrites en 12.10, 12.11, et 12.12.

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

12.10.1 Procédure

Placer les deux transducteurs réciproques dans un coupleur de référence dont le volume et l'élasticité acoustique sont connus précisément. Mesurer l'impédance électrique de transfert entre l'un des transducteurs utilisé comme projecteur et l'autre transducteur utilisé comme hydrophone à un certain nombre de fréquences dans la bande de fréquences concernée.

Placer les deux transducteurs réciproques dans un coupleur auxiliaire avec l'hydrophone à étalonner. Mesurer les impédances électriques de transfert entre chacun des transducteurs et l'hydrophone et entre chacun des transducteurs et l'autre transducteur utilisé comme hydrophone aux mêmes fréquences que ci-dessus.

A partir des cinq impédances électriques de transfert mesurées à chaque fréquence, calculer la sensibilité en pression acoustique de l'hydrophone.

NOTE 1 Il n'est pas nécessaire que les fluides de remplissage dans les deux coupleurs soient les mêmes.

NOTE 2 Un coupleur peut remplir ces deux objectifs s'il est conçu de sorte que ses propriétés soient bien connues lorsque l'hydrophone n'est pas présent.

12.10.2 Théorie

La disposition pour un étalonnage par réciprocité doit être conforme à la Figure 7 et à la Figure 8.

NOTE 1 La Figure 7 présente deux transducteurs dans un coupleur de référence, et la Figure 8 présente trois transducteurs dans un coupleur auxiliaire.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

12.8 Uncertainty

The reciprocity, linearity, and high-frequency limit conditions shall be satisfied as specified in 8.6.6, 8.6.7, and 12.5 and provided that equation (47) is valid, the overall expanded uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration shall be less than 1 dB.

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

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

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

12.9 Limitations

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

NOTE Hydrophones that can be calibrated in the reciprocity coupler shall be able to be mounted in a coupler in such a manner that they form a hard acoustic boundary within the coupler or their contribution to the compliance of the coupler shall be known. They shall also be designed in such a way that the interior volume of the coupler is known when they are mounted in the coupler. Few hydrophones meet these restrictions. In order to calibrate a more general population of hydrophones, it is necessary to extend the process by use of the techniques described in 12.10, 12.11, and 12.12.

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

12.10.1 Procedure

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

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

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

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

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

12.10.2 Theory

The arrangement for a reciprocity calibration shall be in accordance with Figure 7 and Figure 8.

NOTE 1 Figure 7 shows two transducers in a reference coupler, and Figure 8 shows three transducers in an auxiliary coupler.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Placer deux transducteurs réciproques, T et P, et un hydrophone H dans le coupleur auxiliaire. Désigner toutes les grandeurs qui se rapportent au coupleur auxiliaire avec des nombres premiers. A partir de l'équation (47), la sensibilité de l'hydrophone doit être calculée par:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C'_{\mathrm{t}} \frac{\left|Z'_{\mathrm{PH}}\right|\left|Z'_{\mathrm{TH}}\right|}{\left|Z'_{\mathrm{PT}}\right|} \tag{49}$$

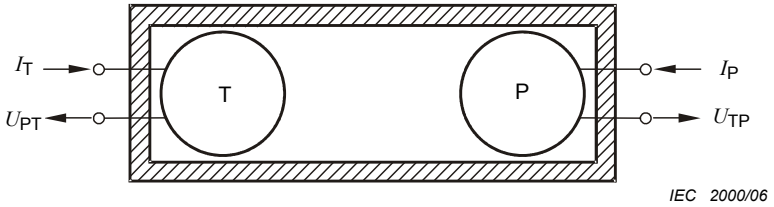


Figure 7 – Coupleur de référence avec deux transducteurs: un projecteur P et un transducteur réciproque T

où, dans ce cas, la valeur de C'_{t} n'est pas connue. Afin de déterminer l'impédance électrique de transfert entre le projecteur T comme source sonore et le transducteur P comme hydrophone, mesurer le courant électrique I'_{T} dans le transducteur T et la tension U'_{TP}. La relation entre le courant d'entrée et la tension de sortie doit être:

$$U'_{\mathrm{TP}} = M_{\mathrm{P}} S'_{\mathrm{T}} I'_{\mathrm{T}} \tag{50}$$

où S'_{T} est la réponse à l'émission en courant du transducteur dans le coupleur auxiliaire et M_{P} est la sensibilité en champ libre du projecteur. A partir de l'équation (50), l'impédance électrique de transfert Z'_{TP} doit être calculée par:

$$\left|Z'_{\mathrm{TP}}\right| = U'_{\mathrm{TP}} / I'_{\mathrm{T}} = M_{\mathrm{P}} S'_{\mathrm{T}} \tag{51}$$

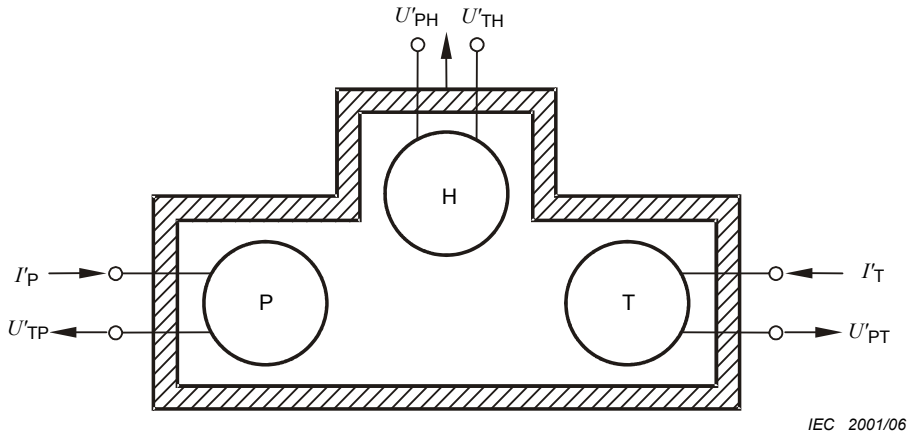


Figure 8 – Coupleur auxiliaire avec trois transducteurs: un projecteur P, un transducteur réciproque T, et un hydrophone H à étalonner

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Place two reciprocal transducers, T and P, and a hydrophone H in the auxiliary coupler. Denote all quantities that refer to the auxiliary coupler with primes. From equation (47), the hydrophone sensitivity shall be calculated by:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C'_{\mathrm{t}} \frac{\left|Z'_{\mathrm{PH}}\right|\left|Z'_{\mathrm{TH}}\right|}{\left|Z'_{\mathrm{PT}}\right|} \tag{49}$$

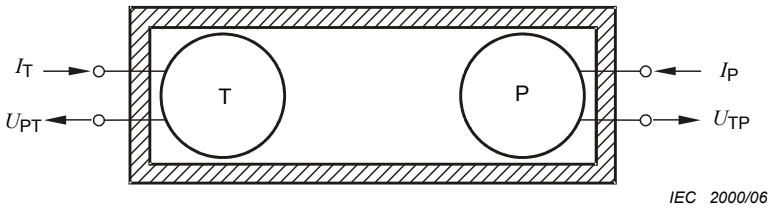


Figure 7 – Reference coupler with two transducers: a projector P and a reciprocal transducer T

where, in this, C'_{t} is not known. To determine the electrical transfer impedance between the projector T as a sound source and the transducer P as a hydrophone, measure the electrical current I'_{T} into transducer T and the voltage U'_{TP}. The relationship between the input current and output voltage shall be:

$$U'_{\mathrm{TP}} = M_{\mathrm{P}} S'_{\mathrm{T}} I'_{\mathrm{T}} \tag{50}$$

where S'_{T} is the transmitting response to current of the transducer in the auxiliary coupler and M_{P} is the free-field sensitivity of the projector. From equation (50), the electrical transfer impedance Z'_{TP} shall be calculated by:

$$\left|Z'_{\mathrm{TP}}\right| = U'_{\mathrm{TP}} / I'_{\mathrm{T}} = M_{\mathrm{P}}\, S'_{\mathrm{T}} \tag{51}$$

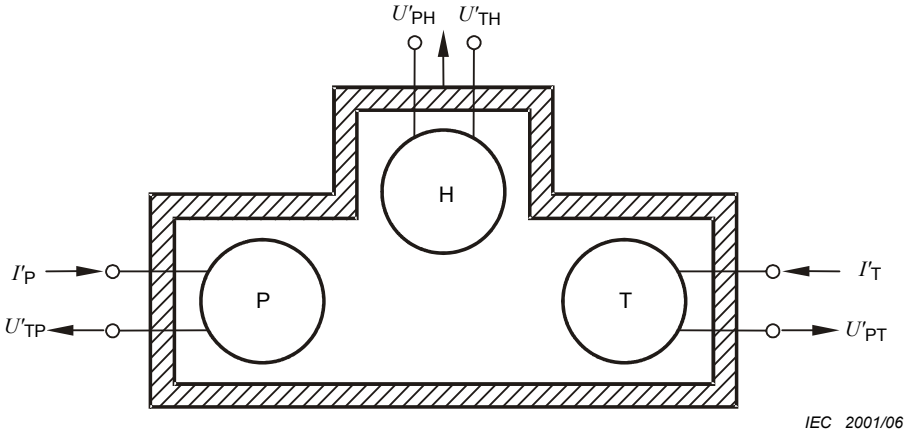


Figure 8 – Auxiliary coupler with three transducers: a projector P, a reciprocal transducer T, and a hydrophone H to be calibrated

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Etant donné que le transducteur T est réciproque, calculer:

$$S_{\mathrm{T}}' = \frac{M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}'} \tag{52}$$

où M_{T} est la sensibilité en champ libre du transducteur.

Remplacer l'équation (52) par l'équation (51) pour obtenir:

$$\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right| = \frac{M_{\mathrm{P}} M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}'} \tag{53}$$

Placer à présent les deux transducteurs réciproques dans le coupleur de référence et mesurer l'impédance électrique de transfert entre le projecteur T comme source sonore et le transducteur P comme hydrophone. De la même manière que ci-dessus, calculer:

$$\left|Z_{\mathrm{TP}}\right| = \frac{M_{\mathrm{P}} M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}} \tag{54}$$

A partir des équations (53) et (54), la relation entre l'élasticité dans le coupleur auxiliaire et l'élasticité dans le coupleur de référence doit être la suivante:

$$C_{\mathrm{t}}' = C_{\mathrm{t}} \frac{\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|}{\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right|} \tag{55}$$

Remplacer l'équation (55) par l'équation (49):

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \left|Z_{\mathrm{TP}}\right| \frac{\left|Z_{\mathrm{PH}}'\right| \left|Z_{\mathrm{TH}}'\right|}{\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right| \left|Z_{\mathrm{PT}}'\right|} \tag{56}$$

NOTE 2 En utilisant cette méthode, les hydrophones rigides petits ordinaires peuvent être étalonnés avec une incertitude faible. Le fluide de remplissage dans le coupleur auxiliaire peut différer de celui dans le coupleur de référence. Il n'est pas nécessaire que l'élasticité dans le coupleur auxiliaire soit connue et elle est en effet mesurée en mesurant l'impédance électrique de transfert entre les deux transducteurs réciproques dans chacun des deux coupleurs.

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

12.11.1 Procédure

Placer les deux transducteurs réciproques dans un coupleur de référence dont le volume et l'élasticité acoustique sont connus précisément. Mesurer l'impédance électrique de transfert entre l'un des transducteurs utilisé comme projecteur et l'autre transducteur utilisé comme hydrophone à un certain nombre de fréquences dans la bande de fréquences concernée.

Placer les deux transducteurs réciproques dans un coupleur auxiliaire avec l'hydrophone à étalonner et la source sonore. Mesurer l'impédance électrique de transfert entre la source sonore et l'hydrophone et entre la source sonore et chacun des transducteurs réciproques utilisés comme hydrophone aux mêmes fréquences que ci-dessus.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Since the transducer T is reciprocal, calculate:

$$S_{\mathrm{T}}' = \frac{M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}'} \tag{52}$$

where M_{T} is the free-field sensitivity of the transducer.

Substitute equation (52) into equation (51) to yield:

$$\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right| = \frac{M_{\mathrm{P}} M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}'} \tag{53}$$

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

$$\left|Z_{\mathrm{TP}}\right| = \frac{M_{\mathrm{P}} M_{\mathrm{T}}}{\omega C_{\mathrm{t}}} \tag{54}$$

From equations (53) and (54), the relationship between the compliance in the auxiliary coupler and the compliance in the reference coupler shall be written as:

$$C_{\mathrm{t}}' = C_{\mathrm{t}} \frac{\left|Z_{\mathrm{TP}}\right|}{\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right|} \tag{55}$$

Substitute equation (55) into equation (49):

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \left|Z_{\mathrm{TP}}\right| \frac{\left|Z_{\mathrm{PH}}'\right| \left|Z_{\mathrm{TH}}'\right|}{\left|Z_{\mathrm{TP}}'\right| \left|Z_{\mathrm{PT}}'\right|} \tag{56}$$

NOTE 2 Using this method, ordinary small hard hydrophones may be calibrated with low uncertainty. The fill fluid in the auxiliary coupler can differ from that in the reference coupler. The compliance in the auxiliary coupler need not be known and is in effect, measured by measuring the electrical transfer impedance between the two reciprocal transducers in each of the two couplers.

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

12.11.1 Procedure

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

A partir des quatre impédances électriques de transfert mesurées à chaque fréquence, calculer la sensibilité en pression acoustique de l'hydrophone.

NOTE Il n'est pas nécessaire que les fluides de remplissage dans les deux coupleurs soient les mêmes.

12.11.2 Théorie

NOTE 1 La Figure 7 présente deux transducteurs dans le coupleur de référence, et la Figure 9 présente trois transducteurs et une source sonore dans un coupleur auxiliaire.

La disposition pour un étalonnage doit être conforme à la Figure 7 et à la Figure 8.

Le rapport $\left|Z'_{\mathrm{PH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{PT}}\right|$ doit être le rapport des tensions provenant de l'hydrophone H et du transducteur T lorsqu'ils sont soumis au même niveau de pression acoustique produit par le projecteur P. Ce rapport doit être indépendant du transducteur utilisé pour produire le son. Si une source sonore S produit le son, calculer la relation suivante:

$$\left|Z'_{\mathrm{PH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{PT}}\right| = \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{ST}}\right| \tag{57}$$

De la même manière, le calcul suivant doit être effectué:

$$\left|Z'_{\mathrm{TH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{TP}}\right| = \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{SP}}\right| \tag{58}$$

Remplacer les équations (57) et (58) par l'équation (56) pour obtenir:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \left|Z_{\mathrm{TP}}\right| \frac{\left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right|}{\left|Z'_{\mathrm{ST}}\right| \left|Z'_{\mathrm{SP}}\right|} \tag{59}$$

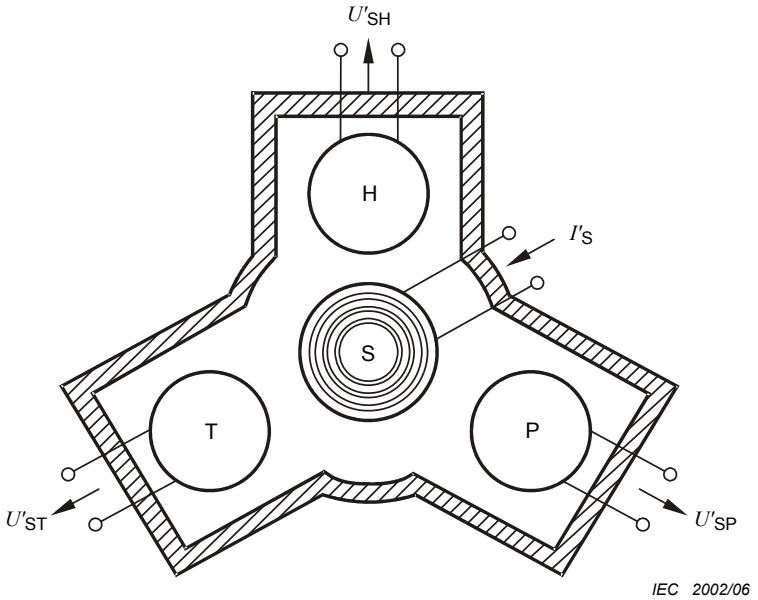


Figure 9 – Coupleur auxiliaire avec quatre transducteurs; un projecteur P, un transducteur réciproque T, une source sonore S, et un hydrophone H à étalonner

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

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

12.11.2 Theory

NOTE 1 Figure 7 shows two transducers in the reference coupler and Figure 9 shows three transducers and a sound source in an auxiliary coupler.

The arrangement for a calibration shall be in accordance with Figure 7 and Figure 8.

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

$$\left|Z'_{\mathrm{PH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{PT}}\right| = \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{ST}}\right| \tag{57}$$

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

$$\left|Z'_{\mathrm{TH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{TP}}\right| = \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| / \left|Z'_{\mathrm{SP}}\right| \tag{58}$$

Substitute equations (57) and (58) into equation (56) to yield:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \left|Z_{\mathrm{TP}}\right| \frac{\left|Z'_{\mathrm{SH}}\right| \left|Z'_{\mathrm{SH}}\right|}{\left|Z'_{\mathrm{ST}}\right| \left|Z'_{\mathrm{SP}}\right|} \tag{59}$$

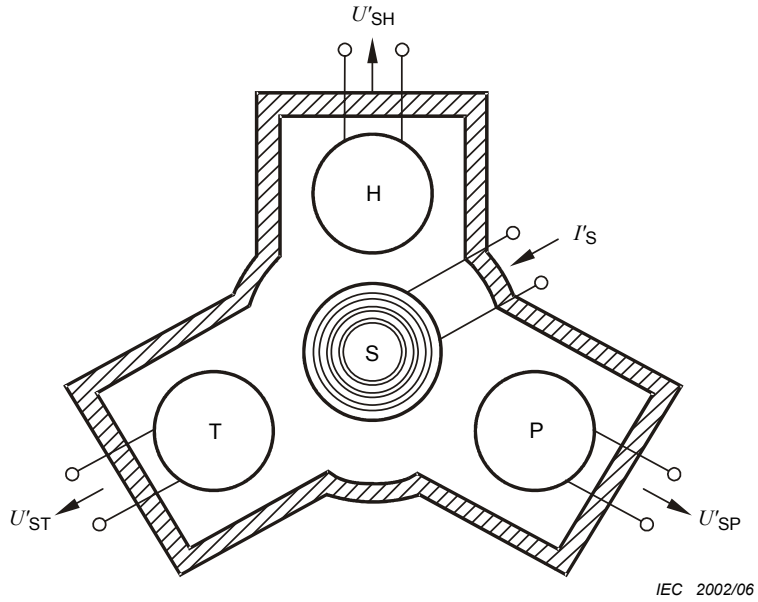


Figure 9 – Auxiliary coupler with four transducers; a projector P, a reciprocal transducer T, a sound source S, and a hydrophone H to be calibrated

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 2 En utilisant cette méthode, les hydrophones rigides petits ordinaires peuvent être étalonnés avec une précision élevée. Le fluide de remplissage dans le coupleur auxiliaire peut différer de celui dans le coupleur de référence. Il n'est pas nécessaire que l'élasticité dans le coupleur auxiliaire soit connue et elle est en effet mesurée en mesurant l'impédance électrique de transfert entre les deux transducteurs réciproques dans chacun des deux coupleurs. Seules les pressions acoustiques à T, P, et H doivent être les mêmes. Une fois que l'impédance électrique de transfert $|Z_{\mathrm{TP}}|$ est mesurée, il n'est pas nécessaire que le transducteur soit à nouveau utilisé comme source sonore. Ceci entraîne une stabilité maximale pour le transducteur T.

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

12.12.1 Procédure

Un transducteur réciproque, une source sonore électroacoustique linéaire, un hydrophone et un matériau subsidiaire d'élasticité connue doivent être utilisés pour l'étalonnage. La sensibilité de l'hydrophone doit être déterminée.

En premier lieu, ne pas placer l'organe subsidiaire dans le coupleur. Placer les trois transducteurs dans le coupleur et remplir le coupleur d'un fluide (généralement de l'eau). En utilisant le transducteur réciproque comme projecteur et l'hydrophone comme récepteur, mesurer le module de l'impédance électrique de transfert à un certain nombre de fréquences dans la bande de fréquences concernée (voir 7.5).

En utilisant la source sonore comme projecteur et, en alternance, le transducteur réciproque et l'hydrophone comme récepteurs, mesurer les impédances électriques de transfert au même ensemble de fréquences que les mesures ci-dessus.

Placer l'organe subsidiaire dans le coupleur. Mesurer à nouveau les trois impédances électriques de transfert ci-dessus.

A partir des six impédances électriques de transfert mesurées à chaque fréquence, calculer la sensibilité en pression acoustique de l'hydrophone.

NOTE Il n'est pas nécessaire de connaître l'élasticité du coupleur.

12.12.2 Théorie

La disposition de l'hydrophone, du projecteur, du transducteur et de l'organe subsidiaire doit être conforme à la Figure 10. Il s'agit d'un coupleur acoustique et il doit donc être conforme à 12.3, que l'organe subsidiaire soit ou non dans le coupleur [63].

NOTE 1 Dans cette méthode, on suppose que l'élasticité acoustique du coupleur sans l'organe subsidiaire n'est pas connue, mais que l'élasticité acoustique de l'organe subsidiaire est précisément connue. En effet, l'élasticité acoustique du coupleur est déterminée à partir de l'élasticité acoustique de l'organe subsidiaire.

Comme en 12.3, calculer la sensibilité en champ libre d'un hydrophone dans un coupleur sans l'organe subsidiaire par:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \frac{|Z_{\mathrm{PH}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PT}}|} \equiv \omega C_{\mathrm{t}} Z_{\mathrm{eq}} \qquad (60)$$

où les impédances électriques de transfert $Z_{\mathrm{PH}}, Z_{\mathrm{TH}}$ et Z_{PT} doivent être conformes à 8.2 et où Z doit contenir tous les termes impliquant les impédances électriques de transfert.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 2 Using this method, ordinary small hard hydrophones may be calibrated to a high accuracy. The fill fluid in the auxiliary coupler can differ from that in the reference coupler. The compliance in the auxiliary coupler need not be known and is, in effect, measured by measuring the electrical transfer impedance between the two reciprocal transducers in each of the two couplers. Only the acoustical pressures at T, P, and H are required to be the same. Once the electrical transfer impedance $|Z_{\mathrm{TP}}|$ is measured, the transducer does not need to be used as a sound source again. This results in maximum stability for the transducer T.

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

12.12.1 Procedure

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

At first, do not place the subsidiary body in the coupler. Place the three transducers in the coupler and fill the coupler with a fluid (usually water). Using the reciprocal transducer as a projector and the hydrophone as a receiver, measure the magnitude of the electrical transfer impedance at a number of frequencies throughout the frequency range of interest (see 7.5).

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

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

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

NOTE Knowledge of the coupler compliance is not needed.

12.12.2 Theory

The arrangement of the hydrophone, projector, transducer and subsidiary body shall be in accordance with Figure 10. This is an acoustic coupler and so shall be in accordance with 12.3 whether or not the subsidiary body is in the coupler [63].

NOTE 1 In this method, it is assumed that the acoustical compliance of the coupler without the subsidiary body is not known, but that the acoustical compliance of the subsidiary body is accurately known. In effect, the acoustical compliance of the coupler is determined from the acoustical compliance of the subsidiary body.

As in 12.3, calculate the free-field sensitivity of a hydrophone in a coupler without the subsidiary body by:

$$M_{\mathrm{H}}^2 = \omega C_{\mathrm{t}} \frac{|Z_{\mathrm{PH}}||Z_{\mathrm{TH}}|}{|Z_{\mathrm{PT}}|} \equiv \omega C_{\mathrm{t}} Z_{\mathrm{eq}} \qquad (60)$$

where the electrical transfer impedances $Z_{\mathrm{PH}}, Z_{\mathrm{TH}}$ and Z_{PT} shall be in accordance with 8.2 and where Z shall contain all the terms involving electrical transfer impedances.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

A présent, si l'organe subsidiaire est placé dans le coupleur, l'élasticité du coupleur doit être calculée à partir de $C_t + \Delta C_t$, où ΔC_t est donné par:

$$\Delta C_t = V_b \left\{ \frac{3(1-2\sigma)}{E} - \frac{1}{\rho_f \, c_f^2} \right\} \tag{61}$$

où

V_b est le volume de l'organe subsidiaire;

E est le module de Young pour l'organe subsidiaire;

σ est le module de Poisson pour l'organe subsidiaire;

ρ_f est la densité du fluide du coupleur; et

c_f est la vitesse du son dans le fluide du coupleur;

$3V_b(1-2\sigma)/E$ est l'élasticité acoustique de l'organe subsidiaire;

$V_b / \rho_f C_f^2$ est l'élasticité acoustique du fluide déplacé par l'organe subsidiaire.

$$M_H^2 = \omega(C_t + \Delta C_t) \frac{\left|Z'_{PH}\right| \left|Z'_{TH}\right|}{\left|Z'_{PT}\right|} \equiv \omega(C_t + \Delta C_t) Z'_{eq} \tag{62}$$

Eliminer C_t des deux expressions provenant de M_H^2 pour obtenir:

$$M_H^2 = \frac{Z_{eq} Z'_{eq}}{Z_{eq} - Z'_{eq}} \omega \Delta C_t \tag{63}$$

La fréquence limite supérieure pour une dimension de coupleur donnée doit être augmentée à l'aide du facteur de correction suivant K_f^2 pour l'équation (63):

$$K_f^2 = \frac{\sin(kL)}{k\,L \cos(kz) \cos\left[k(L-z)\right]} \tag{64}$$

où

k est le nombre d'ondes;

L est la longueur du coupleur;

z est la distance entre le couvercle de la chambre et le plan des transducteurs (voir Figure 10).

Dans ce cas, la valeur corrigée de la sensibilité en pression d'un hydrophone doit être calculée à partir de:

$$(M_H)_{cor} = K_f M_H \tag{65}$$

NOTE 2 Pour une cavité de chambre de dimensions égales à 175 mm (diamètre) et 500 mm (longueur), l'incertitude étendue globale de l'étalonnage (niveaux de confiance de 95 %) peut être inférieure à 0,5 dB jusqu'à 500 Hz [57].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$\Delta C_t = V_b \left\{ \frac{3(1-2\sigma)}{E} - \frac{1}{\rho_f \, c_f^2} \right\} \tag{61}$$

where

V_b is the volume of the subsidiary body;

E is Young's modulus for the subsidiary body;

σ is Poisson's modulus for the subsidiary body;

ρ_f is the density of coupler fluid; and

c_f is the speed of sound in the coupler fluid.

$3V_b(1-2\sigma)/E$ is the acoustical compliance of the subsidiary body.

$V_b / \rho_f C_f^2$ is the acoustical compliance of the fluid displaced by the subsidiary body.

$$M_H^2 = \omega(C_t + \Delta C_t) \frac{\left|Z'_{PH}\right| \left|Z'_{TH}\right|}{\left|Z'_{PT}\right|} \equiv \omega(C_t + \Delta C_t) Z'_{eq} \tag{62}$$

Eliminate C_t from the two expressions from M_H^2 to obtain:

$$M_H^2 = \frac{Z_{eq} Z'_{eq}}{Z_{eq} - Z'_{eq}} \omega \Delta C_t \tag{63}$$

The upper frequency limit for a given coupler size shall be increased using the following correction factor K_f^2 for equation (63):

$$K_f^2 = \frac{\sin(kL)}{k\,L \cos(kz) \cos\left[k(L-z)\right]} \tag{64}$$

where

k is wave number;

L is length of coupler;

z is distance from chamber lid to plane of the transducers (see Figure 10).

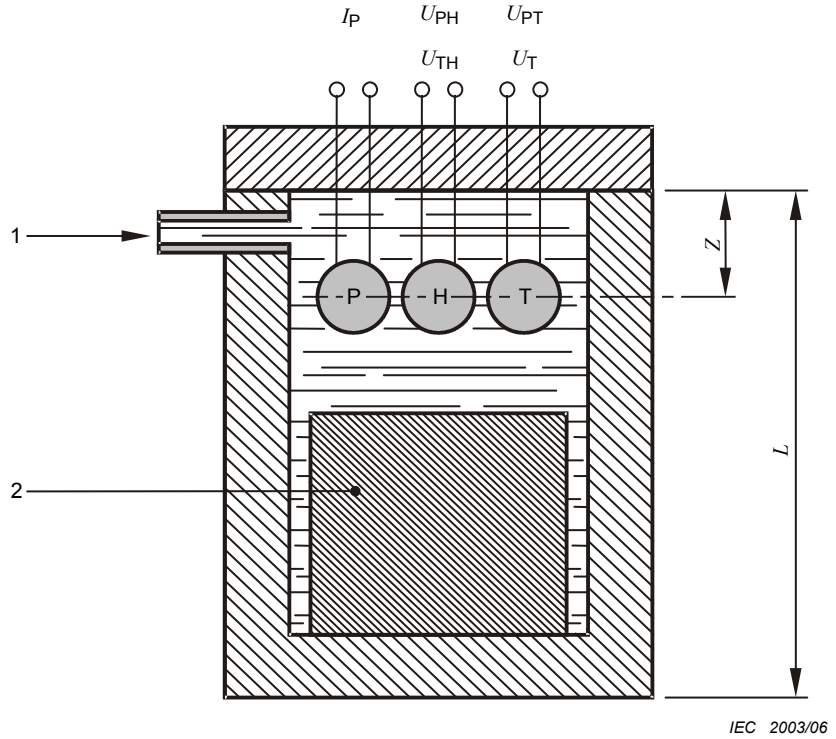
In this case, the corrected value of the pressure sensitivity of a hydrophone shall be calculated from:

$$(M_H)_{cor} = K_f M_H \tag{65}$$

NOTE 2 For a chamber cavity of dimensions 175 mm (diameter) and 500 mm (length) the overall expanded uncertainty of the calibration (95 % confidence levels) can be less than 0,5 dB up to 500 Hz [57].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

1 Pression statique

2 Organe d'élasticité connue

Figure 10 – Schéma du système de mesure

NOTE 3 Cette méthode ne nécessite pas de connaître l'élasticité du coupleur qui est généralement difficile à déterminer précisément. Elle nécessite à la place de connaître l'élasticité de l'organe subsidiaire et le fluide de remplissage qui peut être déterminé précisément.

13 Etalonnage avec un pistonphone

13.1 Principe

Un hydrophone est étalonné à des fréquences basses à l'intérieur d'une chambre fermée, remplie d'air ou partiellement remplie d'eau. Une méthode simple pour l'étalonnage dans une chambre de petites dimensions, avec ou sans transducteur étalon, est utilisée, dans la bande de fréquences comprise entre quelques hertz et plusieurs centaines de hertz [1], [64].

NOTE Cette méthode peut également être utilisée pour l'étalonnage et la vérification des performances des microphones, [65] à [67].

13.2 Procédure

13.2.1 Généralités

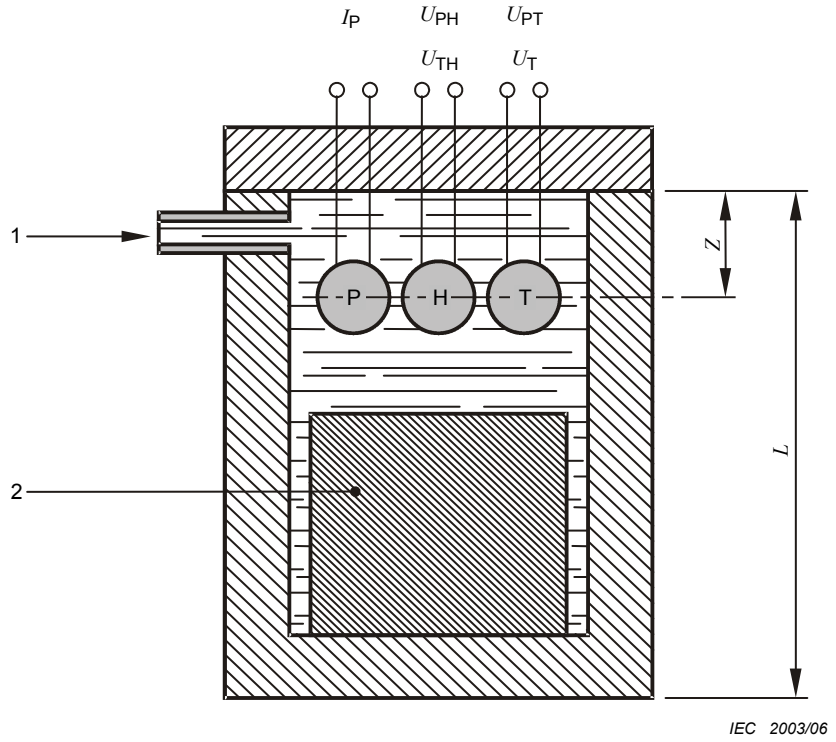
L'étalonnage doit être effectué conformément à 13.2.2 ou 13.2.3.

13.2.2 Etalonnage absolu

NOTE 1 Dans un pistonphone, la pression acoustique est produite dans une petite chambre fermée remplie d'air par un piston vibrant de façon sinusoïdale, entraîné par un signal à onde continue. Le piston peut être entraîné par un moteur électrique ou un transducteur à bobine mobile. La pression acoustique p dans la chambre doit être calculée à partir de la connaissance de l'impédance acoustique, Z, et de la vitesse du volume, u :

$$p = uZ \tag{66}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

1 Static pressure

2 Body of known compliance

Figure 10 – Schematic drawing of the measuring system.

NOTE 3 This method does not require knowledge of the compliance of the coupler which is usually difficult to determine accurately. It instead requires knowledge of the compliance of a subsidiary body and the fill fluid which can be determined accurately.

13 Calibration with a pistonphone

13.1 Principle

A hydrophone is calibrated at low frequencies inside a closed chamber, filled with air or partly filled with water. A simple method for calibration in a small chamber, without or with a standard transducer, is used, in the frequency range from a few hertz to several hundred hertz [1], [64].

NOTE This method may also be used for the calibration and performance checking of microphones [65] to [67].

13.2 Procedure

13.2.1 General

The calibration shall be performed in accordance with 13.2.2 or 13.2.3.

13.2.2 Absolute calibration

NOTE 1 In a pistonphone, the sound pressure is generated in a small closed air-filled chamber by a sinusoidally vibrating piston driven with a continuous wave signal. The piston may be driven by an electric motor or moving-coil transducer. The acoustic pressure p in the chamber shall be calculated from knowledge of the acoustic impedance, Z, and the volume velocity, u:

$$p = uZ \qquad (66)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 2 La vitesse du volume variant de façon sinusoïdale peut être écrite en termes de dérivée de la variation de volume V_D.

Calculer la pression acoustique p dans la chambre à l'aide de l'équation suivante:

$$p = j\omega V_D \frac{1}{j\omega C_M} = \frac{V_D}{C_M} \quad (67)$$

où C_M est l'élasticité du milieu, et V_D est la variation de volume.

La pression acoustique générée est manifestement indépendante de la fréquence et doit par conséquent être calculée à partir de la connaissance de V_D et de C_M.

La variation de volume doit être calculée à partir de la surface du piston et du déplacement linéaire si un dispositif permettant de mesurer la variation est disponible.

NOTE 3 Ceci peut être effectué à l'aide d'un interféromètre optique.

Si le piston ne se comporte pas parfaitement, sa surface « réelle » doit être utilisée dans le calcul de V_D.

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

NOTE 4 L'élasticité peut être considérée comme l'élasticité du milieu uniquement, étant donné que l'élasticité des limites de la chambre, de l'hydrophone et du microphone est généralement bien inférieure au milieu.

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

$$C_M = \frac{V_0}{\gamma p_0} \quad (68)$$

où

V_0 est le volume total;

p_0 est la pression statique; et

γ est le rapport des chaleurs spécifiques pour le gaz.

NOTE 5 Il peut être nécessaire d'apporter des corrections à C_M, par exemple, pour prendre en compte la conduction de la chaleur des parois de la chambre.

Un pistonphone doit être utilisé pour obtenir un étalonnage absolu, et la sensibilité en pression de l'hydrophone, M_p, doit être calculée à partir de:

$$M_p = \frac{U_H}{p} \quad (69)$$

où U_H est la tension de réception générée par l'hydrophone.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 2 The sinusoidally varying volume velocity may be written in terms of the derivative of the volume displacement V_D.

Calculate the acoustic pressure p in the chamber using:

$$p = j\omega V_D \frac{1}{j\omega C_M} = \frac{V_D}{C_M} \quad (67)$$

where C_M is the compliance of the medium, and V_D is the volume displacement.

Clearly the sound pressure generated is independent of frequency and therefore shall be calculated from knowledge of V_D and C_M.

The volume displacement shall be calculated from the piston area and linear displacement if a means of measuring the displacement is available.

NOTE 3 This may be done using an optical interferometer.

If the piston does not behave as a perfect piston, its 'effective' area shall be used in the calculation of V_D.

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

NOTE 4 The compliance may be taken to be the compliance of only the medium since the compliance of the chamber boundaries, hydrophone and microphone are generally much smaller than the medium.

The compliance shall be calculated from the gas laws:

$$C_M = \frac{V_0}{\gamma p_0} \quad (68)$$

where

V_0 is the total volume;

p_0 is the static pressure; and

γ is the ratio of specific heats for the gas.

NOTE 5 Corrections may need to be made to C_M, for example, to account for the heat conduction of the chamber walls.

A pistonphone shall be used to obtain an absolute calibration, and the pressure sensitivity of the hydrophone, M_p, shall be calculated from:

$$M_p = \frac{U_H}{p} \quad (69)$$

where U_H is the receive voltage generated by the hydrophone.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Lorsque les conditions suivantes sont satisfaites, la sensibilité en pression M_{p} doit être considérée comme étant égale à la sensibilité en champ libre M_{H} :

a) le facteur de diffraction de l'hydrophone est égal à l'unité;
b) l'hydrophone présente une réponse négligeable à la vitesse des particules et au gradient de pression;
c) soit la fréquence d'étalonnage est suffisamment inférieure à la fréquence de résonance la plus basse de l'hydrophone, de sorte que la sensibilité de l'hydrophone est indépendante de l'impédance acoustique, soit l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la chambre est égale à l'impédance acoustique dans un champ libre.

Ceci doit être supposé être le cas et M_{H} doit être utilisée à la place de M_{p} pour l'étalonnage utilisant le pistonphone. A partir des équations (67) à (69), la sensibilité de l'hydrophone doit être calculée par:

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{V_0\, U_{\mathrm{H}}}{V_{\mathrm{D}}\, \gamma\, p_0} \tag{70}$$

13.2.3 Etalonnage relatif

13.2.3.1 Généralités

Un étalonnage relatif doit être effectué conformément à 13.2.3.2 ou 13.2.3.3.

13.2.3.2 Transducteur de référence étalonné

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

NOTE 1 Ceci a l'avantage de ne pas rendre nécessaire le calcul de la variation de volume et de l'élasticité.

Le dispositif de référence utilisé doit être un microphone étalonné. La sensibilité de l'hydrophone doit être calculée à partir de:

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{U_{\mathrm{H}}}{U_{\mathrm{M}}} M_{\mathrm{M}} \tag{71}$$

où U_{M} et M_{M} sont la tension de réception et la sensibilité du microphone.

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

NOTE 2 Ceci garantit que le volume du coupleur ne varie pas entre les mesures.

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

When the following conditions are met, the pressure sensitivity M_{p} shall be taken as equal to the free-field sensitivity M_{H}:

a) the diffraction factor of the hydrophone is unity;
b) the hydrophone has negligible response to particle velocity and pressure gradient;
c) either the frequency of calibration is sufficiently below the lowest resonance frequency of the hydrophone so that the sensitivity of the hydrophone is independent of acoustic impedance or the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the chamber is equal to the acoustic impedance in a free field.

This shall be assumed to be the case and M_{H} shall be used in place of M_{p} for calibration using the pistonphone. From equations (67) to (69), the hydrophone sensitivity shall be calculated by:

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{V_0\, U_{\mathrm{H}}}{V_{\mathrm{D}}\, \gamma\, p_0} \tag{70}$$

13.2.3 Relative calibration

13.2.3.1 General

A relative calibration shall be carried out in accordance with 13.2.3.2 or 13.2.3.3.

13.2.3.2 Calibrated reference transducer

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

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

The reference device used shall be a calibrated microphone. The sensitivity of the hydrophone shall be calculated from:

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{U_{\mathrm{H}}}{U_{\mathrm{M}}} M_{\mathrm{M}} \tag{71}$$

where U_{M} and M_{M} are the receive voltage and sensitivity of the microphone.

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

13.2.3.3 Pistonphone air–eau

Le piston doit être utilisé pour entraîner une petite cavité d'air au-dessus de l'eau et la pression acoustique doit être la même à la fois dans l'air et dans l'eau. Un microphone doit être utilisé pour contrôler la pression dans la cavité d'air. Un étalonnage par comparaison entre deux hydrophones doit être effectué, ou bien un étalonnage absolu doit être tenté [1], [64].

NOTE 1 La Figure 11 présente un schéma d'un pistonphone air–eau utilisé pour un étalonnage par comparaison entre deux hydrophones.

NOTE 2 Un pistonphone air–eau présente l'avantage suivant: en raison de la vitesse du son plus élevée (et par conséquent des longueurs d'ondes plus grandes) dans le milieu liquide, la fréquence à laquelle la pression n'est plus uniforme est augmentée. Il convient de veiller à ce que la conception de la chambre reste simple et symétrique pour obtenir une pression acoustique uniforme dans la bande de fréquences la plus élevée.

NOTE 3 Un pistonphone entièrement rempli d'eau a également été utilisé [1]. Cependant, contrairement au cas du milieu atmosphérique, l'élasticité des limites peut ici ne plus être faible par rapport à celle de l'eau (la gaine, le câble et les parois délimitantes de l'hydrophone peuvent tous contribuer à ceci), nécessitant une mesure de l'élasticité au cours de chaque étalonnage.

13.3 Limites

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

NOTE 1 La fréquence augmentant, la pression deviendra non uniforme à mesure que les modes d'ondes commencent à devenir évidents dans la chambre. Si la chambre est à géométrie simple, des corrections peuvent être apportées à ces modes d'ondes, mais l'incertitude relative aux corrections augmentera avec la fréquence. Ceci déterminera en général la limite de la fréquence supérieure de fonctionnement qui dépendra de la taille de la chambre. Pour les dimensions d'une chambre type, ceci sera de l'ordre de 300 Hz à 500 Hz.

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

La méthode ne doit pas être utilisée à des fréquences inférieures à la fréquence limite inférieure provoquée par la conduction thermique entre l'air et les parois de la chambre et les fuites d'air autour du piston.

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

13.2.3.3 Air-water pistophone

The piston shall be used to drive a small air cavity above the water and the sound pressure shall be the same in both air and water. A microphone shall be used to monitor the pressure in the air cavity. Either a comparison calibration between two hydrophones shall be performed or an absolute calibration shall be attempted [1], [64].

NOTE 1 Figure 11 shows a schematic diagram of an air-water pistonphone used for a comparison calibration between two hydrophones.

NOTE 2 An air-water pistonphone has the advantage that due to the greater sound speed (and consequent larger wavelengths) in the water medium, the frequency at which the pressure is no longer uniform is increased. Care should be taken to keep the chamber design simple and symmetric to achieve a uniform acoustic pressure over the largest frequency range.

NOTE 3 A completely water-filled pistonphone has also been used [1]. However, unlike the case of an air medium, here the compliance of the boundaries may no longer be small compared with that of the water (the hydrophone boot, cable and boundary walls may all contribute) requiring the compliance to be measured during each calibration.

13.3 Limitations

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

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

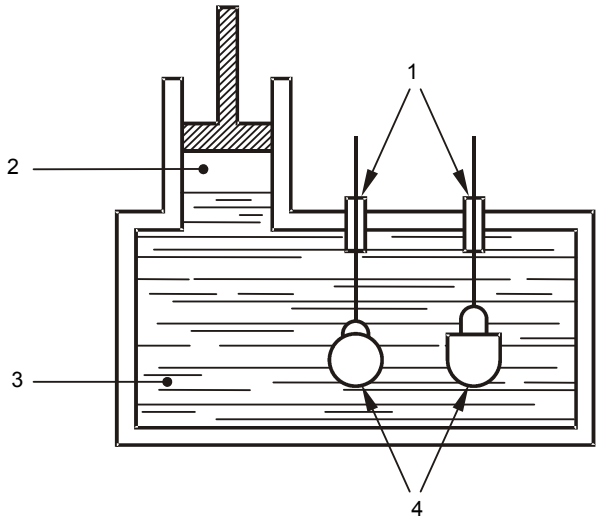
NOTE 2 Non-uniform pressure will lead to errors in an absolute calibration since the acoustic pressure at the hydrophone may not be that calculated from the piston volume velocity and chamber compliance. In the case of a comparison calibration, the hydrophone and reference microphone/hydrophone may not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

The method shall not be used at frequencies lower than the lower limiting frequency caused by thermal conduction between the air and the chamber walls and air leakage around the piston.

NOTE 3 Departure from purely adiabatic conditions may occur at low frequencies due to thermal conduction between the air and the chamber walls. The effect is small in general, but it increases as the frequency decreases. At frequencies greater than 5 Hz, the effect is negligible.

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

1 Traversées des parois étanches

2 Air

3 Eau

4 Hydrophones

Figure 11 – Pistonphone

13.4 Incertitude

L'incertitude globale doit être évaluée et établie avec la sensibilité de l'hydrophone. Si les conditions spécifiées en 13.1, 13.2 et 13.3 sont satisfaites, l'incertitude étendue globale (niveaux de confiance de 95 %) de l'étalonnage doit être inférieure à 0,5 dB.

NOTE 1 Pour l'étalonnage par comparaison à l'aide du pistonphone, l'incertitude sera en général supérieure. Avec une bonne pratique, elle peut être inférieure à 1,0 dB (niveaux de confiance de 95 %).

NOTE 2 Les éléments suivants contribueront à des sources d'incertitude dans les étalonnages absolus à l'aide d'un pistonphone: mesure de l'amplitude de déplacement du piston, mesure de la surface réelle du piston, mesure du volume d'air d'équilibre de la chambre, mesure de la pression atmosphérique d'équilibre dans la chambre.

NOTE 3 Les éléments suivants contribueront à des sources d'incertitude dans les étalonnages relatifs à l'aide d'un pistonphone: incertitudes dans l'étalonnage du microphone ou de l'hydrophone de référence.

NOTE 4 Les éléments suivants contribueront à des sources d'incertitude dans les deux méthodes: incertitude dans les mesures électriques effectuées par les appareils, par exemple les voltmètres (peut être réduite si les deux tensions sont mesurées à l'aide du même appareil), gain de tous les amplificateurs d'hydrophones utilisés, manque de pression acoustique uniforme dans la chambre (hautes fréquences), conduction thermique entre l'air et les parois de la chambre (basses fréquences), fuites d'air autour du piston (basses fréquences).

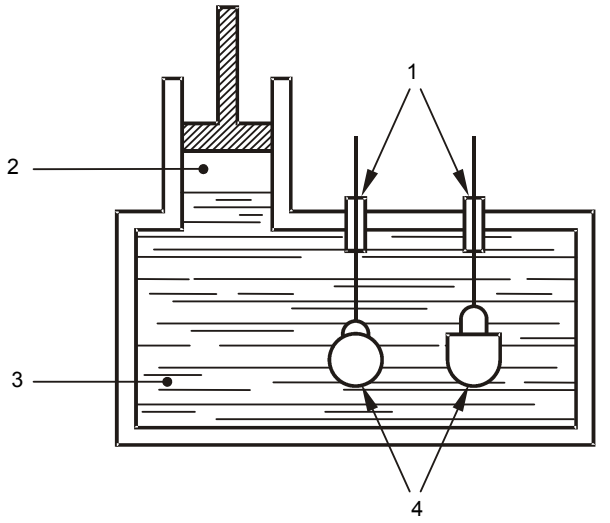
14 Etalonnage avec une colonne vibrante

14.1 Principe

Une méthode simple pour l'étalonnage d'un hydrophone dans une chambre ouverte est utilisée, sans transducteur étalon, dans la bande de fréquences de 10 Hz à 1 kHz. Cette méthode permet d'étalonner un hydrophone de façon simple, dans une colonne de liquide en communication avec l'extérieur, à des fréquences basses dans une gamme où la longueur d'onde est supérieure à la longueur de la colonne [1], [67].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

1 Bulkhead feed-throughs

2 Air

3 Water

4 Hydrophones

Figure 11 – Pistonphone

13.4 Uncertainty

The overall uncertainty shall be evaluated and stated with the hydrophone sensitivity. If the conditions specified in 13.1, 13.2 and 13.3 are satisfied, the overall expanded uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration shall be less than 0,5 dB.

NOTE 1 For comparison calibration using the pistonphone, the uncertainty will in general be higher. With good practice it can be less than 1,0 dB (95 % confidence levels).

NOTE 2 The following will contribute to sources of uncertainty in absolute calibrations using a pistonphone: measurement of the piston displacement amplitude; measurement of the effective area of the piston; measurement of the equilibrium air volume of the chamber; measurement of the equilibrium air pressure in the chamber.

NOTE 3 The following will contribute to sources of uncertainty in relative calibrations using a pistonphone: uncertainties in the calibration of the reference microphone or hydrophone.

NOTE 4 The following will contribute to sources of uncertainty in both methods: uncertainty in electrical measurements made by equipment such as voltmeters (may be reduced if both voltages are measured using same equipment); the gain of any hydrophone amplifiers used; lack of uniform acoustic pressure in the chamber (high frequencies); thermal conduction between air and chamber walls (low frequencies); air leakage around piston (low frequencies).

14 Calibration with a vibrating column

14.1 Principle

A simple method for calibration of a hydrophone in an open chamber is carried out, without a standard transducer, in the frequency range from 10 Hz to 1 kHz. This method, uses an open column of liquid at low frequencies at which the wavelength is larger than the length of the column, allowing a hydrophone to be calibrated in a simple way [1], [67].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

14.2 Procédure

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

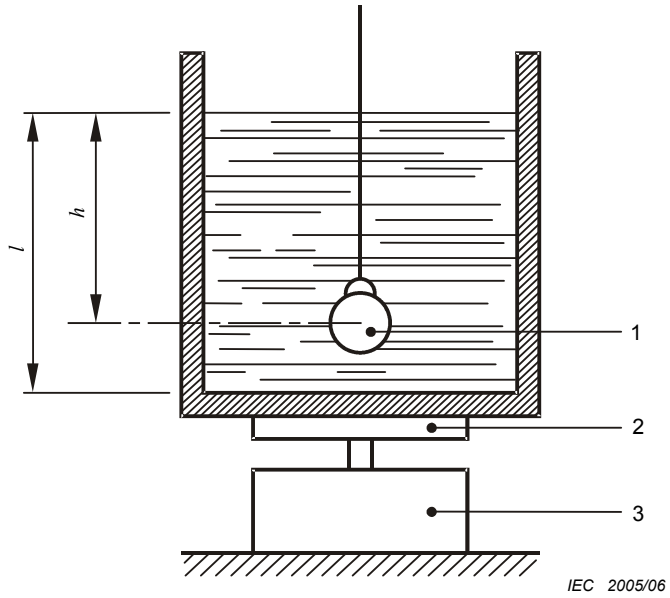
La colonne de liquide doit être contenue dans un récipient cylindrique avec des parois rigides. A l'intérieur de ce récipient, ouvert sur la partie supérieure, l'excitation de la colonne de liquide doit s'effectuer soit par un transducteur électrodynamique fixé sur la partie inférieure, soit par un générateur de vibrations, excitant l'ensemble du récipient, conformément à la Figure 12.

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

NOTE 1 Cette méthode est une méthode d'étalonnage absolu, bien qu'elle se prête aussi à l'étalonnage par comparaison séparée. Voir 13.2.

La limite supérieure de la bande de fréquences utile dépend de la dimension du récipient, qui ne doit pas dépasser un quart de la longueur d'onde du son dans le liquide, voir 14.5.1.

NOTE 2 Une bande de fréquences de 10 Hz à 1 kHz peut généralement être utilisée.



Légende

1 Hydrophone

2 Piston

3 Générateur de vibrations

Figure 12 – Colonne vibrante

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

14.2 Procedure

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

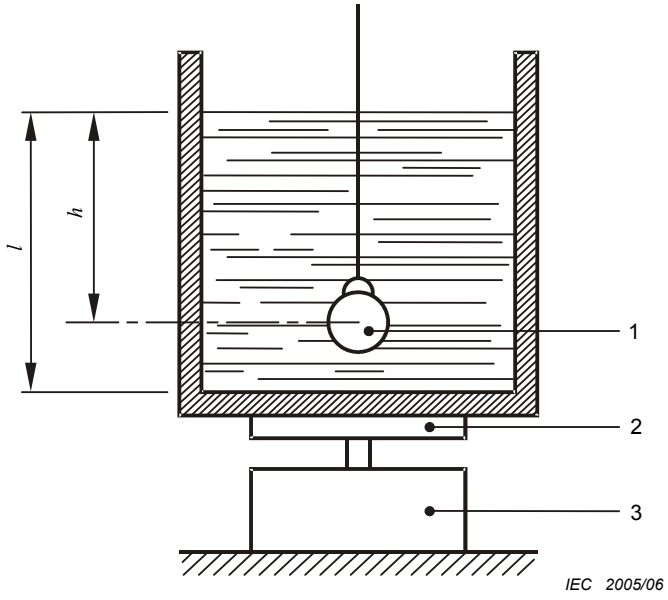
The column of liquid shall be contained in a cylindrical vessel with rigid walls. Within this vessel, open at the top, the liquid column shall either be driven at the bottom by an electrodynamic transducer, or the whole vessel shall be driven by a vibrating generator, in accordance with Figure 12.

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

NOTE 1 This method is an absolute calibration, although it lends itself to calibration by separated comparison as well. See 13.2.

The upper limit of the useful frequency range depends on the size of the vessel, which shall be smaller than a quarter of the wavelength of the sound in the liquid, see 14.5.1.

NOTE 2 Generally a frequency range from 10 Hz to 1 kHz can be used.



Key

1 Hydrophone

2 Piston

3 Vibration generator

Figure 12 – Vibrating column

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

14.3 Expression pour la pression

En supposant que tous les points du liquide se déplacent de façon égale par rapport à leur position d'équilibre, l'amplitude crête $\hat{p}$ de la pression oscillatoire en un point du liquide situé à une profondeur h sous la surface doit être calculée par:

$$\hat{p} = \rho\ \hat{x} \left| \mathrm{g} - h\omega^2 \right| \tag{72}$$

où

ρ est la densité du liquide;

$\hat{x}$ est l'amplitude crête vibratoire à la base du récipient;

g est l'accélération due à la pesanteur; et

ω est la fréquence angulaire de la vibration.

NOTE Dans cette équation, on ne tient pas compte des fluctuations de pression dues à l'écoulement du liquide autour de l'hydrophone. Ces fluctuations sont faibles par rapport à la pression du signal, lorsque l'hydrophone est petit par rapport à la profondeur d'immersion et lorsque l'amplitude vibratoire est petite par rapport à la dimension de l'hydrophone. Voir [63].

A des fréquences très basses, où la valeur de $h\omega^2$ est faible par rapport à g, l'équation (72) doit se réduire à:

$$\hat{p} = \rho\ \mathrm{g}\ \hat{x} \tag{73}$$

qui est indépendante de la fréquence.

A des fréquences plus élevées, lorsque la valeur de $h\omega^2$ devient grande par rapport à g, la pression doit être proportionnelle au carré de la fréquence:

$$\hat{p} = \rho\ \hat{x}\ h\ \omega^2 \tag{74}$$

Le changement entre ces deux expressions doit être considéré comme se produisant à une fréquence angulaire correspondant à:

$$\omega_{\mathrm{o}} = \sqrt{\frac{\mathrm{g}}{h}} \tag{75}$$

qui, par exemple, correspond à une fréquence de 1,6 Hz lorsque h = 10 cm.

Par conséquent, l'équation (74) doit être pratiquement valable aux fréquences supérieures à 10 Hz.

14.4 Détermination de la sensibilité

La sensibilité en pression de l'hydrophone M_{p} doit être calculée en faisant le rapport des valeurs crêtes de la tension en circuit ouvert $\hat{U}$ à la pression $\hat{p}$, données par les équations (72), (73) ou (74):

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{\hat{U}}{\hat{p}} \tag{76}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

14.3 Expression for the pressure

Supposing that all parts of the liquid move equally with respect to their equilibrium position, the peak amplitude $\hat{p}$ of the oscillating pressure at a point in the liquid at a depth of h below the surface shall be calculated by:

$$\hat{p} = \rho\, \hat{x} \left| \mathrm{g} - h\omega^2 \right| \tag{72}$$

where

ρ is the density of the liquid;

$\hat{x}$ is the peak amplitude of the vibration of the bottom of the vessel;

g is the acceleration due to gravity; and

ω is the angular frequency of the vibration.

NOTE Pressure fluctuations due to the flow of the liquid past the hydrophone are disregarded in this equation. These fluctuations are small compared with the signal pressure when the hydrophone is small compared with the depth of immersion and when the vibration amplitude is small compared with the size of the hydrophone. See [63].

At very low frequencies, where $h\omega^2$ is small compared with g, equation (72) shall be reduced to:

$$\hat{p} = \rho\, \mathrm{g}\, \hat{x} \tag{73}$$

which is independent of the frequency.

At higher frequencies, when $h\omega^2$ becomes large compared with g, the pressure shall be proportional to the square of the frequency:

$$\hat{p} = \rho\, \hat{x}\, h\, \omega^2 \tag{74}$$

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

$$\omega_{\mathrm{o}} = \sqrt{\frac{\mathrm{g}}{h}} \tag{75}$$

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

Hence, equation (74) shall be practically valid at frequencies higher than 10 Hz.

14.4 Determination of the sensitivity

The pressure sensitivity of the hydrophone M_{p} shall be calculated as the ratio of the peak values of the open circuit voltage $\hat{U}$ and the pressure $\hat{p}$, as given by equations (72), (73) or (74):

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{\hat{U}}{\hat{p}} \tag{76}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Lorsque les conditions suivantes sont satisfaites, la sensibilité en pression M_{p} doit être égale à la sensibilité en champ libre M_{H} :

a) la constante de diffraction de l'hydrophone est égale à l'unité;
b) l'hydrophone présente une réponse négligeable à la vitesse des particules et au gradient de pression;
c) soit la fréquence d'étalonnage est suffisamment inférieure à la fréquence de résonance la plus basse de l'hydrophone, de sorte que la sensibilité de l'hydrophone est indépendante de l'impédance acoustique, soit l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la chambre est égale à l'impédance acoustique dans un champ libre.

Ceci est supposé être le cas et M_{H} doit être utilisée à la place de M_{p} pour l'étalonnage avec une colonne vibrante.

L'étalonnage doit être effectué dans les conditions spécifiées aux Articles 6 et 7.

La valeur crête de la tension en circuit ouvert aux bornes électriques de l'hydrophone doit être mesurée conformément à 7.3.

Pour la détermination de la valeur crête de la pression, on doit mesurer soit l'amplitude crête de la vibration $\hat{x}$ à la base du récipient, soit la valeur crête de l'accélération $\hat{x}\,\omega^2$.

Ces mesures doivent être effectuées avec une incertitude inférieure à 1 % (niveaux de confiance de 95 %).

L'accélération doit être mesurée au moyen d'un accéléromètre placé à la base du récipient.

La profondeur d'immersion h doit soit être mesurée à partir du centre de référence de la partie de l'hydrophone destinée à recueillir les signaux sonores, voir 3.3, soit la valeur de h doit être éliminée de l'équation en répétant la mesure à deux profondeurs différentes h_1 et h_2. Les valeurs crêtes des tensions de sortie de l'hydrophone doivent être respectivement $\hat{U}_1$ et $\hat{U}_2$.

Par suite, si:

$$\Delta\hat{U} = \hat{U}_1 - \hat{U}_2 \tag{77}$$

et

$$\Delta h = h_1 - h_2 \tag{78}$$

les équations (74) et (76) doivent donner soit:

$$\Delta\hat{U} = M_H \rho\, \hat{x}\, \omega^2 \Delta h \tag{79}$$

soit:

$$M_{\mathrm{H}} = \frac{\Delta\hat{U}}{\Delta h}\frac{1}{\rho\,\hat{x}\,\omega^2} \tag{80}$$

NOTE Dans l'équation (80), la valeur absolue de la profondeur d'immersion est éliminée et remplacée par la différence entre les profondeurs d'immersion pour deux mesures. Cette différence peut être obtenue sans qu'il soit nécessaire de connaître la position du centre acoustique de l'hydrophone.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

When the following conditions are met, the pressure sensitivity M_p shall be equal to the free-field sensitivity M_H:

a) the diffraction constant of the hydrophone is unity;
b) the hydrophone has negligible response to particle velocity and pressure gradient;
c) either the frequency of calibration is sufficiently below the lowest resonance frequency of the hydrophone so that the sensitivity of the hydrophone is independent from acoustic impedance or the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the chamber is equal to the acoustic impedance in a free field.

This is assumed to be the case and M_H shall be used in place of M_p for calibration with a vibrating column.

The calibration shall be performed under the conditions specified in Clauses 6 and 7.

The peak value of the open-circuit voltage at the electrical terminals of the hydrophone shall be measured in accordance with 7.3.

For the determination of the peak value of the pressure, either the peak amplitude of the vibration $\hat{x}$ at the bottom of the vessel or the peak value of the acceleration $\hat{x}\,\omega^2$ shall be measured.

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

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

The depth of immersion h shall either be measured at the reference centre of the part of the hydrophone designed to receive sound, see **3.3,** or the value of h shall be eliminated from the equation by repetition of the measurement at two different depths h_1 and h_2. The peak values of the output voltages at the hydrophone shall be respectively $\hat{U}_1$ and $\hat{U}_2$.

Then, if

$$\Delta\hat{U} = \hat{U}_1 - \hat{U}_2 \tag{77}$$

and

$$\Delta h = h_1 - h_2 \tag{78}$$

equations (74) and (76) shall give either:

$$\Delta\hat{U} = M_H \rho\, \hat{x}\, \omega^2 \Delta h \tag{79}$$

or

$$M_H = \frac{\Delta\hat{U}}{\Delta h}\frac{1}{\rho\,\hat{x}\,\omega^2} \tag{80}$$

NOTE In equation (80), the absolute value of the immersion depth is eliminated and replaced by the difference between the immersion depths for two measurements. This difference can be established without knowledge of the location of the acoustic centre of the hydrophone.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La différence de profondeur doit être mesurée avec une incertitude inférieure à 1 %.

14.5 Conditions de mesure

14.5.1 Mécaniques

La suspension de l'hydrophone doit être conçue de manière à ne pas vibrer, ni par contact mécanique avec le récipient, ni par couplage visqueux du liquide. Afin d'éviter d'ajouter des termes correctifs dus à l'écoulement hydrodynamique du liquide autour de l'hydrophone, le diamètre de la colonne doit être suffisamment grand par rapport à celui de l'hydrophone. Pour la même raison, l'amplitude de la vibration doit être petite par rapport à la dimension de l'hydrophone.

La rigidité du récipient doit être suffisamment élevée pour que la fréquence de résonance la plus basse du récipient vide soit supérieure à la fréquence de résonance la plus basse de la colonne de liquide.

La longueur de la colonne doit être supérieure à son diamètre.

NOTE 1 La fréquence de résonance la plus basse d'une telle colonne de liquide non close intervient lorsque la longueur de la colonne est égale au quart de la longueur d'onde. Lorsque la fréquence est inférieure au quart de cette fréquence de résonance, la correction à effectuer est inférieure à 1 dB.

Dans cette condition $\left(\mathrm{l} \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{4} \right)$, la longueur de la colonne ne doit pas dépasser le seizième de la longueur d'onde du son dans le liquide [63].

A des fréquences plus élevées, la pression acoustique dans la colonne doit être donnée par l'équation suivante:

$$\hat{p} = \rho \, \hat{x} \, \omega^2 \, h \frac{\sin\left(\frac{\omega \, h}{c} \right)}{\left(\frac{\omega \, h}{c} \right) \cos\left(\frac{\omega \, \mathrm{l}}{c} \right)} \tag{81}$$

où

c est la vitesse du son dans la colonne de liquide, compte tenu de l'élasticité des parois du récipient, et

l est la longueur de la colonne.

NOTE 2 Cette équation n'est valable que si l est inférieure au quart de la longueur d'onde acoustique dans le liquide.

NOTE 3 Aux basses fréquences, le terme trigonométrique fractionnaire de cette équation tendant vers l'unité, on retrouve l'équation (74).

14.5.2 Acoustiques

Pour être certain que la sensibilité de l'hydrophone mesurée est seulement la sensibilité à la pression, l'impédance acoustique de l'hydrophone doit être grande par rapport à l'impédance acoustique de la colonne de liquide. La valeur de cette dernière impédance dépend de la profondeur h et doit être conforme à l'équation donnant l'impédance acoustique spécifique Z:

$$Z = j \, \rho \, c \tan \frac{\omega \, h}{c} \tag{82}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

14.5 Conditions of measurement

14.5.1 Mechanical

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

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

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

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

For this condition $\left(\mathrm{l} \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{4} \right)$ the length of the column shall not be larger than one-sixteenth of the wavelength of the sound in the liquid [63].

At higher frequencies, the sound pressure in the column shall be given by the following equation:

$$\hat{p} = \rho \, \hat{x} \, \omega^2 \, h \frac{\sin\left(\frac{\omega \, h}{c} \right)}{\left(\frac{\omega \, h}{c} \right) \cos\left(\frac{\omega \, \mathrm{l}}{c} \right)} \tag{81}$$

where

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

l is the length of the column.

NOTE 2 This equation may be applied only if l is smaller than a quarter of the acoustic wavelength in the liquid.

NOTE 3 At low frequencies, the trigonometric fraction in this equation approaches unity, giving equation (74).

14.5.2 Acoustical

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

$$Z = j \, \rho \, c \, \tan \frac{\omega \, h}{c} \tag{82}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Cette valeur doit être de zéro à la surface et doit augmenter jusqu'à l'infini à la profondeur d'un quart de longueur d'onde. Cependant, comme la bande de fréquences utile présente une limite supérieure lorsque la longueur totale de la colonne devient égale à un quart de longueur d'onde, l'hydrophone ne doit jamais être situé en un point de la colonne où l'impédance acoustique spécifique est infiniment élevée.

NOTE 1 Par conséquent, aucun hydrophone immergé à proximité de la surface, même s'il est du type ayant la plus grande élasticité, ne perturbera le champ acoustique, à condition que l'hydrophone soit petit par rapport au diamètre de la colonne. A une profondeur d'immersion plus grande, il est possible d'atteindre un point où le module de l'impédance acoustique de la colonne dépasse le module de l'impédance acoustique de l'hydrophone. A partir de ce point, la sensibilité de l'hydrophone, mesurée à des profondeurs d'immersion plus grandes, paraît diminuer avec la profondeur. Ceci peut être vérifié en effectuant l'étalonnage à différentes profondeurs.

NOTE 2 En tenant compte de la distribution de pression donnée à l'équation (81), il convient que la sensibilité de l'hydrophone ne varie pas avec la profondeur.

Si, toutefois, la sensibilité varie en fonction du rapport entre l'impédance acoustique de l'hydrophone et de la colonne d'eau, l'éventualité d'erreurs dans l'étalonnage doit être examinée, voir l'Annexe E.

14.6 Incertitude

L'incertitude globale doit être évaluée et établie avec la sensibilité de l'hydrophone. A condition que la condition $l \leq \lambda / 16$ soit satisfaite, que la pression soit donnée par l'équation (74), et que la densité ρ du liquide, l'accélération crête à la base du récipient $\hat{x}\,\omega^2$, la profondeur h et la tension crête de sortie $\hat{U}$ soient mesurées avec une incertitude inférieure à 1 %, l'incertitude étendue globale doit être inférieure à 1 dB (niveaux de confiance de 95 %).

NOTE A condition que l'équation (74) soit utilisée pour la pression, les incertitudes dans la vitesse du son, la longueur de la colonne l et la profondeur de l'hydrophone influenceront l'incertitude globale des résultats finaux.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

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

NOTE 2 Taking into account the pressure distribution given in equation (81), the sensitivity of the hydrophone should not change with depth.

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

14.6 Uncertainty

The overall uncertainty shall be evaluated and stated with the hydrophone sensitivity. Provided that the condition $l \leq \lambda/16$ is met, the pressure is given by equation (74), and that the density ρ of the liquid, the peak acceleration at the bottom of the vessel $\hat{x}\,\omega^2$, the depth h and the peak output voltage $\hat{U}$ are measured with an uncertainty of less than 1 %, the overall expanded uncertainty shall be less than 1 dB (95 % confidence levels).

NOTE Provided that equation (74) is used for the pressure, the uncertainties in the speed of sound, the length of the column l and the depth of the hydrophone will influence the overall uncertainty of the final results.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe A
(informative)

Réponse directionnelle d'un hydrophone

A.1 Procédure

Il convient que la détermination complète des caractéristiques d'un hydrophone comporte une mesure de sa réponse directionnelle à des fréquences représentatives situées au-dessus de la bande où il demeure omnidirectionnel (voir 3.18).

La précision de la mesure de la réponse directionnelle est diminuée des mêmes grandeurs que celles qui limitent la précision de la mesure de la sensibilité avec, en outre, d'autres exigences. Une distance de séparation plus grande est généralement nécessaire. (Voir 8.3 et C.2.2). Il convient que le niveau du signal dû aux réflexions et au bruit soit généralement plus faible que dans le cas des mesures de sensibilité de l'axe principal (voir 3.23) par suite du faible niveau des signaux à mesurer dans certaines directions en dehors de l'axe.

Si le centre de référence (voir 3.25) ne se trouve pas sur l'axe de rotation, il peut se produire des erreurs dans la phase et l'amplitude de la réponse directionnelle mesurée, provenant de la variation de la distance de séparation et de la parallaxe. Il convient que le transducteur tourne suffisamment lentement pour que l'enregistreur puisse répondre avec exactitude aux écarts maximaux du niveau de signal, qui peuvent se produire dans les directions de zéro du diagramme directionnel.

En général, les incertitudes dans les diagrammes pour les régions de réponse maximale sont susceptibles d'être de l'ordre de 0,5 dB (niveaux de confiance de 95 %). En outre, une incertitude de 1 dB peut se produire pour toute perte de déviation angulaire de 10 dB à 30 dB. Lorsque l'incertitude est nettement différente de ces valeurs, il convient que l'amplitude et la source de l'incertitude soient recherchées.

A.2 Représentation graphique

Un diagramme de réponse directionnelle est habituellement représenté sous forme de graphique polaire à deux dimensions (voir la CEI 60263:1982). L'échelle du diagramme polaire peut être graduée en niveau de sensibilité ou en perte de déviation angulaire. Il convient de préciser avec chaque diagramme de réponse directionnelle le type de diagramme, la fréquence ou bande de fréquences, l'orientation du diagramme par rapport au système de coordonnées spécifié et les conditions ambiantes qui influent sur le diagramme, telles que la température, la pression ou la profondeur d'immersion, la vitesse du son et la distance. L'échelle angulaire pour un diagramme dans le plan XY est exprimée par rapport à l'angle d'azimut φ. Il convient que le diagramme selon le plan YZ, exprimé par rapport à θ, indique la direction de l'axe des Y positifs et, de façon analogue en ce qui concerne le diagramme dans le plan XZ, il convient que la direction de l'axe des X positifs soit indiquée, à moins que le diagramme dans le plan XY ne soit omnidirectionnel, c'est-à-dire circulaire.

A.3 Facteur de directivité

Le facteur de directivité (R_θ) (VEI 801-25-67) peut être exprimé comme suit:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex A
(informative)

Directional response of a hydrophone

A.1 Procedure

A complete determination of the characteristics of a hydrophone should include a measurement of its directional response at representative frequencies above the range where it is still omnidirectional (see 3.18).

The accuracy of the directional response measurement is affected by the same quantities that limit the accuracy of the sensitivity measurement, together with some additional requirements. A larger separation distance is generally required. (See 8.3 and C.2.2) The signal level attributable to reflections and noise generally should be lower than for measurement of sensitivity of the principal axis (see 3.23) because of the low level of the signals to be measured at some directions off the axis.

If the reference centre (see 3.25) is not on the axis of rotation, errors in the phase and the amplitude of the measured directional response may arise, caused by the varying separation distance and parallax. The transducer should be rotated slowly enough for the recorder to respond accurately to the maximum rate of change in the signal level that may occur around the null directions of the directivity pattern.

In general, uncertainties in the patterns in the region of maximum response can be expected to be about 0,5 dB (95 % confidence levels). In addition, an uncertainty of 1 dB for each angular deviation loss between 10 dB and 30 dB can be expected. When the uncertainty is substantially different from these values, the magnitude and source of the uncertainty should be stated.

A.2 Graphic representation

A directional response pattern usually is presented in the form of a two dimensional polar graph (see IEC 60263:1982). The scale of the polar graph may be in terms of sensitivity level or in angular deviation loss. Each directional response pattern should be identified as to type of pattern, frequency or frequency band, pattern orientation within the specified co-ordinate system, and the ambient conditions upon which the pattern depends, such as temperature, pressure or depth of immersion, speed of sound and distance. The angular scale for a pattern in the XY-plane is expressed as the azimuth angle φ. The pattern in the YZ-plane, expressed as θ, should indicate the direction of the positive Y-axis, and, similarly for the pattern in the XZ-plane, the direction of the positive X-axis should be shown, unless the pattern in the XY-plane is omnidirectional, thus a circle.

A.3 Directivity factor

The directivity factor (R_θ) (IEV 801-25-67) can be expressed as:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$R_\theta = \frac{4\pi d^2 p_a^2}{\int_{Sphere} p^2(\theta,\varphi)\, dS} = 4\pi \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{p(\theta,\varphi)}{p_a} \right)^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \right\}^{-1} \quad \text{(A.1)}$$

où

$p(\theta,\varphi)$ est la pression acoustique en fonction de la direction à une distance donnée d ;

p_a est la pression acoustique dans la direction de référence pour R_θ, à la même distance d ;

d est le rayon de la sphère dont le centre est le centre de référence de l'hydrophone (voir 3.25);

dS est l'élément différentiel d'aire sur la surface de la sphère.

Cette équation se réfère à l'émission du son par le transducteur.

Pour la réception du son, $p(\theta,\varphi)$ et p_a sont remplacées par la tension en circuit ouvert de l'hydrophone, en fonction de la direction de l'onde sonore incidente.

L'équation peut être évaluée à partir des diagrammes directionnels au moyen d'enregistreurs spéciaux et d'un planimètre (voir [5]). Si les enregistrements polaires indiquent que l'hydrophone représente nettement, soit un piston dans un écran acoustique infini, soit une ligne, on peut alors utiliser les valeurs théoriques du facteur de directivité [4], [6] et [7].

A.4 Indice de directivité

Selon la VEI 801-25-68, l'indice de directivité est égal à:

$$D_i = 10 \log R_\theta \quad \text{(A.2)}$$

NOTE Pour les formules, tableaux et graphiques de D_i concernant quelques types d'hydrophones, voir [1] et [4].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$R_\theta = \frac{4\pi d^2 p_a^2}{\int_{Sphere} p^2(\theta,\varphi)\, dS} = 4\pi \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{p(\theta,\varphi)}{p_a} \right)^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \right\}^{-1} \quad \text{(A.1)}$$

where

$p(\theta,\varphi)$ is the sound pressure as a function of the direction at some fixed distance d;

p_a is the sound pressure in the reference direction for R_θ, at the same distance d;

d is the radius of the sphere whose centre is the reference centre of the hydrophone (see 3.25);

dS is the differential element of area on the surface of the sphere.

This equation refers to the emission of sound by the transducer.

For sound reception, $p(\theta,\varphi)$ and p_a are replaced by the open-circuit voltage of the hydrophone as a function of the direction of the impinging sound wave.

The equation can be evaluated from directivity patterns by the use of special plotters and a planimeter (see [5]). If the polar plots indicate that the hydrophone closely represents either a piston in an infinite baffle, or a line, then theoretical values of the directivity factor may be used [4], [6] and [7].

A.4 Directivity index

According to IEV 801-25-68, the directivity index is equal to:

$$D_i = 10 \log R_\theta \quad \text{(A.2)}$$

NOTE For formulae, charts and graphs of D_i for some types of hydrophones, see [1] and [4].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe B
(informative)

Corrections de la charge électrique

B.1 Corrections de la charge électrique

La sensibilité d'un hydrophone est souvent spécifiée comme la sensibilité en circuit ouvert à l'extrémité du câble. Il s'agit de la sensibilité de l'hydrophone à l'extrémité de son câble, lorsqu'il n'est pas connecté à une charge électrique. Lorsqu'une charge électrique spécifique, comme par exemple un oscilloscope, un amplificateur, ou un câble supplémentaire est utilisée à la sortie de l'hydrophone, la sensibilité chargée à l'extrémité du câble de l'hydrophone peut être liée à la sensibilité en circuit ouvert.

B.2 Corrections utilisant l'impédance électrique complexe

Prendre en considération le cas général dans lequel l'hydrophone est considéré comme un réseau à deux bornes d'impédance électrique complexe Z_{H}, relié à une charge électrique d'impédance électrique complexe Z_{L}. La sensibilité chargée à l'extrémité du câble de l'hydrophone, M_{L}, lorsqu'il est relié à la charge spécifiée, est liée à la sensibilité en circuit ouvert à l'extrémité du câble, M_0, selon [12]:

$$M_{\mathrm{L}} = M_0 \sqrt{\frac{Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right)^2 + Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right)^2}{[Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right) + Re\left(Z_{\mathrm{H}}\right)]^2 + [Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right) + Im\left(Z_{\mathrm{H}}\right)]^2}} \tag{B.1}$$

où $Re(\ )$ et $Im(\ )$ indiquent les parties réelles et imaginaires de l'impédance électrique complexe correspondante.

La charge électrique peut souvent être considérée comme une combinaison parallèle d'une résistance R_{L} et d'une capacité C_{L}. Dans ce cas, $Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right)$ et $Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right)$ sont données par:

$$Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right) = \frac{R_{\mathrm{L}}}{1 + \omega^2 C_{\mathrm{L}}^2 R_{\mathrm{L}}^2} \tag{B.2}$$

et

$$Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right) = \frac{-\omega C_{\mathrm{L}} R_{\mathrm{L}}^2}{1 + \omega^2 C_{\mathrm{L}}^2 R_{\mathrm{L}}^2} \tag{B.3}$$

où ω est la fréquence angulaire.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex B
(informative)

Electrical loading corrections

B.1 Electrical loading corrections

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

B.2 Corrections using complex electrical impedance

Consider the general case in which the hydrophone is considered as a two-terminal network of complex electrical impedance Z_{H} connected to an electrical load of complex electrical impedance Z_{L}. The end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone, M_{L}, when connected to the specified load is related to the end-of-cable open-circuit sensitivity, M_0, by [12]:

$$M_{\mathrm{L}} = M_0 \sqrt{\frac{Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right)^2 + Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right)^2}{[Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right) + Re\left(Z_{\mathrm{H}}\right)]^2 + [Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right) + Im\left(Z_{\mathrm{H}}\right)]^2}} \tag{B.1}$$

where $Re(\ )$ and $Im(\ )$ denote the real and imaginary parts of the relevant complex electrical impedance.

Often, the electrical load can be assumed to be a parallel combination of a resistance R_{L} and capacitance C_{L}. In this case, $Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right)$ and $Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right)$ are given by:

$$Re\left(Z_{\mathrm{L}}\right) = \frac{R_{\mathrm{L}}}{1 + \omega^2 C_{\mathrm{L}}^2 R_{\mathrm{L}}^2} \tag{B.2}$$

and

$$Im\left(Z_{\mathrm{L}}\right) = \frac{-\omega C_{\mathrm{L}} R_{\mathrm{L}}^2}{1 + \omega^2 C_{\mathrm{L}}^2 R_{\mathrm{L}}^2} \tag{B.3}$$

where ω is the angular frequency.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

B.3 Corrections utilisant uniquement des capacités

Une autre simplification est possible si les impédances électriques de l'hydrophone et de la charge peuvent être supposées être capacitives. Il s'agit d'une hypothèse valable pour un hydrophone uniquement à des fréquences bien inférieures à la fréquence de résonance, et pour les charges telles que des câbles prolongateurs, à des fréquences basses. Dans ce cas, si C_{H} est la capacité à l'extrémité du câble de l'hydrophone, y compris tous les câbles et connecteurs intégrés, l'équation ci-dessus se réduit à:

$$M_{\mathrm{L}} = M_0 \left[\frac{C_{\mathrm{H}}}{C_{\mathrm{H}} + C_{\mathrm{L}}} \right] \tag{B.4}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

B.3 Corrections using only capacitances

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

$$M_{\mathrm{L}} = M_0 \left[\frac{C_{\mathrm{H}}}{C_{\mathrm{H}} + C_{\mathrm{L}}} \right] \tag{B.4}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe C
(informative)

Techniques par impulsions dans les étalonnages en champ libre

C.1 Généralités

Afin d'obtenir un environnement en champ libre pour l'étalonnage des transducteurs électroacoustiques sous-marins, il convient d'effectuer les mesures en l'absence de réflexions acoustiques provenant des limites du milieu. Ceci peut être obtenu par l'utilisation d'une installation sur un grand volume d'eau, comme par exemple un lac ou un réservoir, ou au cours d'essais en mer. Dans de tels cas, les réflexions sont souvent suffisamment atténuées par les pertes de propagation et par l'absorption aux limites que des signaux à ondes continues peuvent être utilisés. Cependant, des installations de ce type présentent les inconvénients suivants: manque de contrôle de l'environnement, difficultés logistiques dans le déploiement et coûts financiers relativement élevés [1].

Les inconvénients liés à l'utilisation de grands volumes d'eau ont conduit à l'utilisation de cuves de laboratoire pour l'étalonnage. Ces installations fournissent des environnements contrôlés pour l'essai et l'étalonnage des transducteurs et permettent un assemblage et un montage appropriés pour les transducteurs à intégrer dans l'installation à un coût plus modique. Toutefois, pour utiliser des cuves de dimensions finies, il convient de trouver un moyen d'éliminer l'effet des échos d'épaulement (ou au moins de contrôler ou de limiter leur influence). Une méthode consiste à recouvrir les limites d'absorbeurs. Cependant, les absorbeurs efficaces pour l'acoustique sous-marine sont coûteux et fournissement rarement une absorption à large bande suffisante à des fréquences basses en kilohertz. Néanmoins, les absorbeurs sont utiles dans la réduction du temps de réverbération global de la cuve, permettant des fréquences de répétition des signaux plus rapides.

La méthode la plus commune pour obtenir un environnement en champ libre pour l'étalonnage consiste à utiliser des techniques de portillonnage électronique pour séparer les signaux émis des signaux reçus. Le signal propagé direct peut ensuite être isolé dans le domaine temporel avant l'arrivée de réflexions limites (qui subissent un trajet de propagation plus long et arrivent plus tard). Un intervalle de temps approprié est nécessaire entre la transmission d'impulsions successives pour que toute réverbération puisse disparaître [69].

Des salves de sons à une seule fréquence sont généralement utilisées comme forme de signal. Le signal peut être généré à l'aide d'un oscillateur sinusoïdal et d'une unité de portillonnage électronique, ou à l'aide d'un générateur de fonction qui générera directement un signal d'« impulsion sonore ». Ce signal est ensuite balayé à des fréquences discrètes afin de fournir chacune des fréquences requises pour la mesure.

D'autres types de signaux à large bande peuvent être utilisés pour assurer une plage de balayage importante dans chaque impulsion, mais ceux-ci entraîneront généralement un rapport signal sur bruit dégradé aux fréquences de mesure.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex C
(informative)

Pulsed techniques in free-field calibrations

C.1 General

To achieve a free-field environment for the calibration of underwater electroacoustic transducers, the measurements should be made in the absence of acoustic reflections from the boundaries of the medium. This may be achieved by use of a facility based on a large volume of water such as a lake or reservoir, or during trials at sea. In such cases, the reflections are often sufficiently attenuated by propagation losses and by absorption at the boundaries that continuous wave signals may be employed. However, such facilities have disadvantages such as lack of environmental control, logistical difficulties in deployment, and relatively high financial cost [1].

The disadvantages of using large volumes of water have led to the use of laboratory tanks for calibration. Such facilities provide controlled environments for test and calibration of transducers and enable suitable rigging and mounting for the transducers to be incorporated into the facility at more affordable cost. However, to use finite-sized tanks, a means should be found to eliminate the effect of boundary echoes (or at least to control or limit their influence). One method is to coat the boundaries with absorbers. However, effective absorbers for underwater sound are expensive and rarely provide sufficient broadband absorption at low kilohertz frequencies. Nevertheless, absorbers are useful in reducing the overall reverberation time of the tank, allowing faster signal repetition rates.

The most common method of achieving a free-field environment for calibration is to use electronic gating techniques to gate the transmitted and received signals. The direct path signal may then be isolated in the time-domain before the arrival of boundary reflections (which undergo a longer propagation path and arrive later in time). A suitable time interval is necessary between the transmission of successive pulses to allow any reverberation to die away [69].

Typically, bursts of single frequency sound are used as the signal type. The signal may be generated using a sinusoidal oscillator and an electronic gating unit, or using a function generator that will generate a ‘tone-burst’ signal directly. This signal is then swept through discrete frequencies to provide each of the required frequencies for measurement.

Other broadband signal types may be used to provide great frequency coverage within each pulse, but these will usually result in a degraded signal-to-noise ratio at the frequencies of measurement.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2 Considérations

C.2.1 Temps sans écho

La Figure C.1 présente un schéma de deux transducteurs dans une cuve de laboratoire en coupe transversale rectangulaire illustrant les sources d'échos d'épaulement. Par des considérations géométriques simples (et en connaissant la vitesse du son dans l'eau), il est possible de calculer l'instant d'arrivée des échos et par conséquent la quantité de signaux du domaine temporel disponibles pour l'analyse avant l'arrivée des échos, à savoir le « temps sans écho ».

Noter que dans l'exemple, les transducteurs sont positionnés de façon optimale sur un axe central de la cuve, afin de donner le délai le plus important entre l'arrivée du trajet direct et l'arrivée des échos d'épaulement. Cependant, la quantité de temps sans écho dépendra de la distance de séparation choisie.

Sans tenir compte des réflexions multiples, si l'instant d'arrivée du $\mathrm{N}^{\text{ième}}$ écho d'épaulement par rapport à l'arrivée du trajet direct est indiqué par T_N et si la vitesse du son est c, il convient que les relations suivantes soient satisfaites:

$$T_1 = \frac{l - d}{c}; \quad T_2 = \frac{2d}{c}; \quad T_3 = \frac{\sqrt{b^2 + d^2} - d}{c}; \quad T_4 = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \tag{C.1}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2 Considerations

C.2.1 Echo-free time

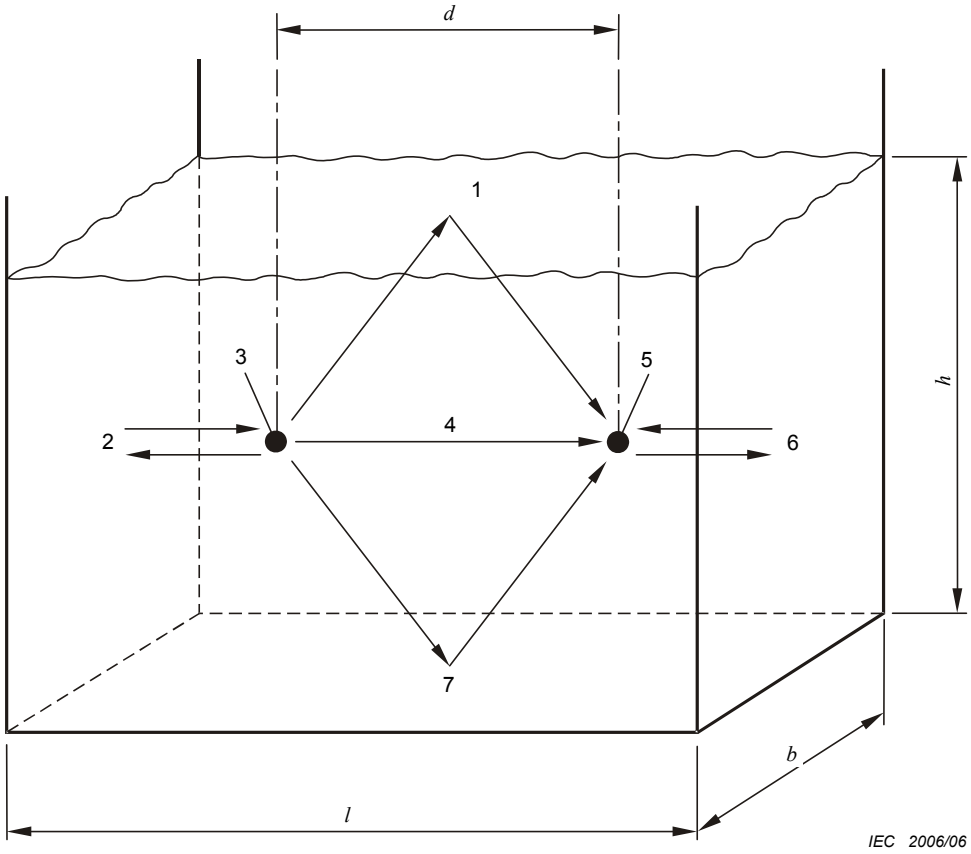
In Figure C.1, a schematic is shown of two transducers in a rectangular cross-sectioned laboratory tank illustrating the sources of echoes from the boundaries. By simple geometrical considerations (and knowing the speed of sound in water), it is possible to calculate the arrival time of the echoes and therefore the amount of time-domain signal available for analysis before the arrival of echoes, the 'echo-free time'.

Note that in the example, the transducers are optimally positioned on a central axis of the tank to give the greatest time delay between the direct path arrival and the arrival of the boundary echoes. However, the amount of echo-free time will depend upon the separation distance chosen.

Ignoring multiple reflections, if the arrival time of the Nth boundary echo relative to the direct path arrival is denoted by T_N and the speed of sound is c, then the following relationships should be satisfied:

$$T_1 = \frac{l - d}{c}; \quad T_2 = \frac{2d}{c}; \quad T_3 = \frac{\sqrt{b^2 + d^2} - d}{c}; \quad T_4 = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \tag{C.1}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

1 Echo à la surface
2 Echo sur la paroi
3 Emetteur
4 Signal direct
5 Récepteur
6 Echo sur la paroi
7 Echo au fond

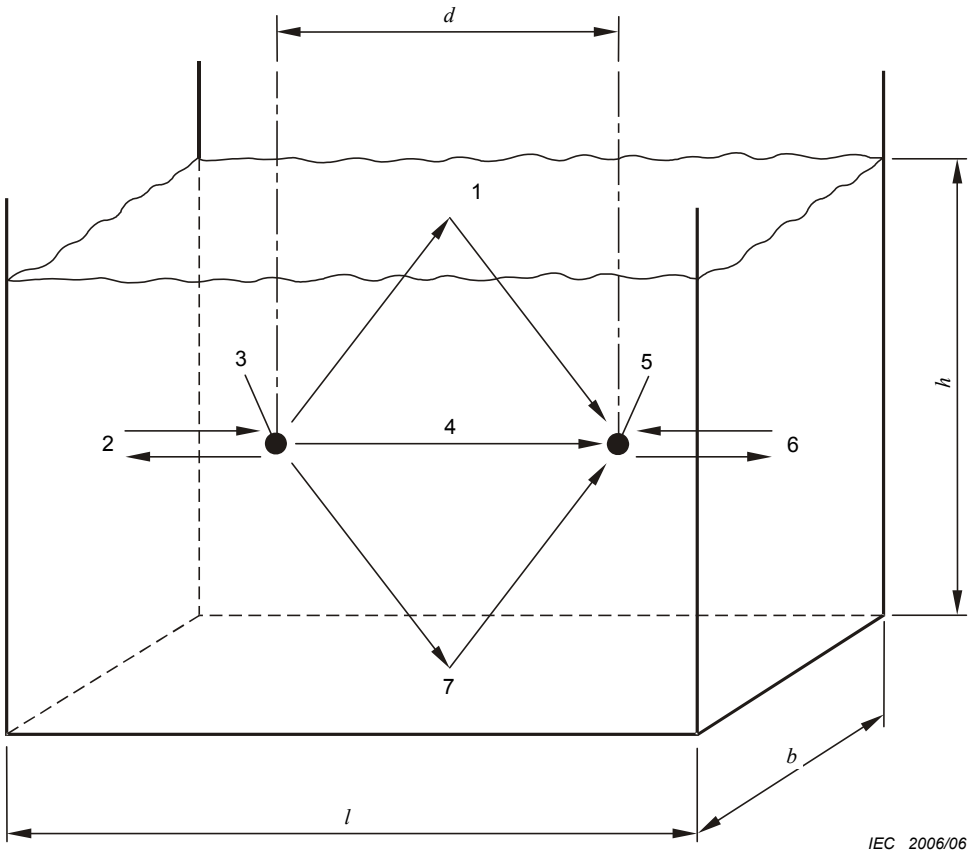
Figure C.1 – Schéma d'un projecteur et d'un récepteur dans une cuve remplie d'eau présentant les sources principales de réflexions

La première relation concerne les réflexions provenant des parois d'extrémité de la cuve, la deuxième se rapporte aux réflexions entre les transducteurs, la troisième concerne les réflexions provenant des parois latérales de la cuve, et enfin la quatrième concerne les réflexions provenant du fond et de la surface de l'eau. Ces formules ont été tracées sur la Figure C.2 pour l'exemple d'une cuve de 6 m de long sur 6 m de large et 5 m de profondeur.

Pour les mesures à effectuer en l'absence de réflexions limites à une distance de séparation choisie, la durée de l'impulsion émise ne peut pas dépasser les valeurs données par la courbe de valeur la plus faible représentée à la Figure C.2. Par exemple, à une séparation de 2 m, le temps sans écho dans cette cuve est d'environ 2,25 ms [1], [2], [12], [38] et [69].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

1	Surface reflection
2	Back wall reflection
3	Transmitter
4	Direct signal
5	Receiver
6	Far wall reflection
7	Bottom reflection

Figure C.1 – Schematic diagram of a projector and receiver in a water tank showing the main sources of reflections

The first relationship concerns reflections from the end walls of the tank, the second relates to reflections between transducers, the third relates to reflections from the side walls of the tank, and finally the fourth relates to the reflections from the bottom and water surface. These formulae have been plotted in Figure C.2 for the example of a tank that is 6 m long by 6 m wide by 5 m deep.

For the measurements to be made in the absence of boundary reflections at a chosen separation distance, the duration of the transmitted pulse cannot exceed the values given by the lowest-valued curve shown on Figure C.2. For example, at a separation of 2 m, the echo-free time in this tank is approximately 2,25 ms [1], [2], [12], [38] and [69].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

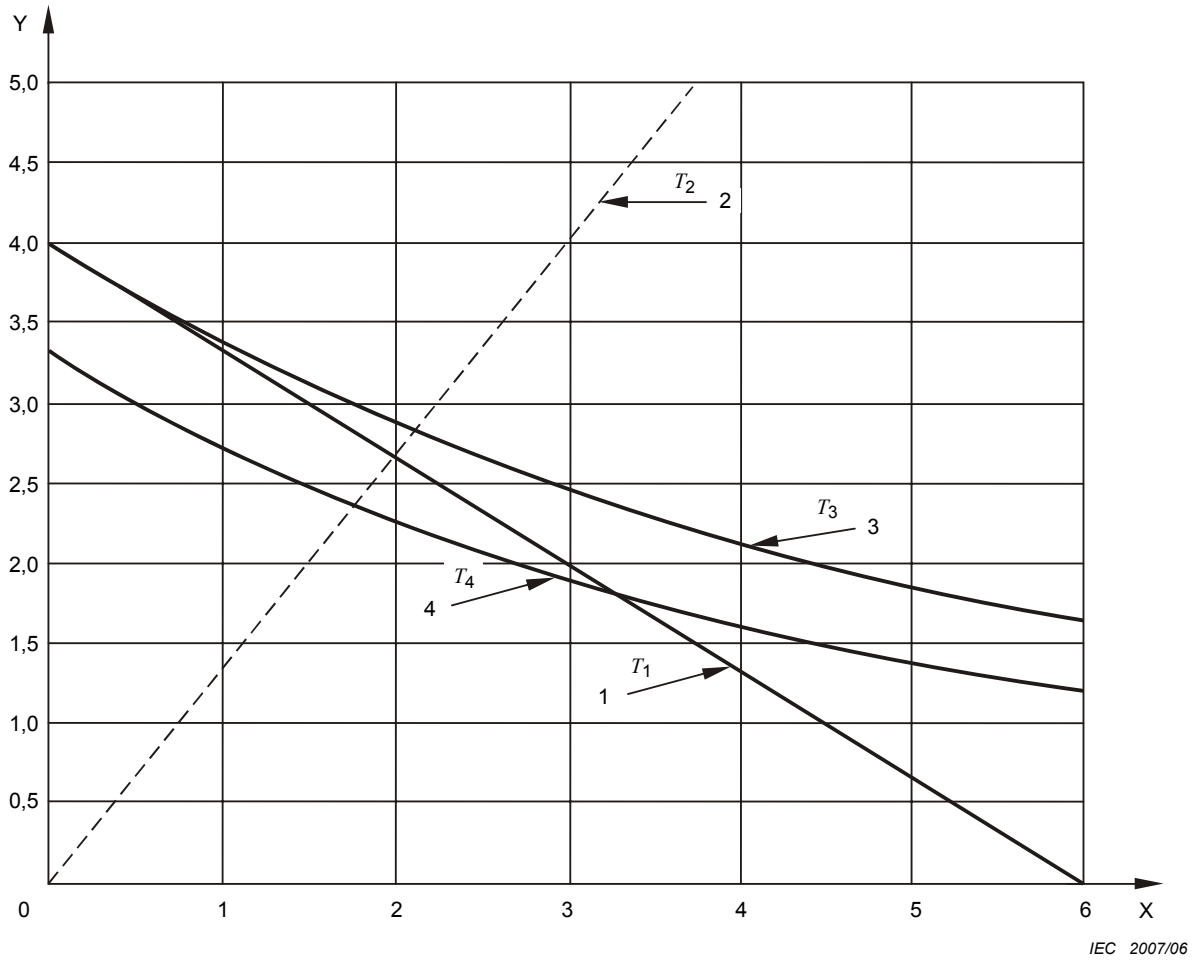
C.2.2 Distance de séparation minimale

Un facteur supplémentaire qu'il convient de prendre en compte est la distance de séparation minimale requise pour atteindre les conditions de champ lointain acceptables, données par:

$$d > \frac{a_1^{\,2} + a_2^{\,2} + a_1 a_2}{\lambda}; \quad d > 5a_1 \quad \text{and} \quad d > 5a_2 \tag{C.2}$$

où λ est la longueur d'onde à la fréquence la plus élevée de mesure. Ceci fournit une limite sur la distance de séparation minimale entre les transducteurs.

Pour la mesure des réponses directionnelles, les exigences relatives à la distance de séparation minimale sont plus rigoureuses et une distance d'au moins deux fois la distance minimale ci-dessus est recommandée, voir 8.3 [41], [42].



Légende

1 Réflexions parois d'extrémité
2 Réflexions entre les transducteurs
3 Réflexions parois latérales
4 Réflexions surface/fond
X Séparation entre les transducteurs (m)
Y Instant d'arrivée de l'écho (ms)

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

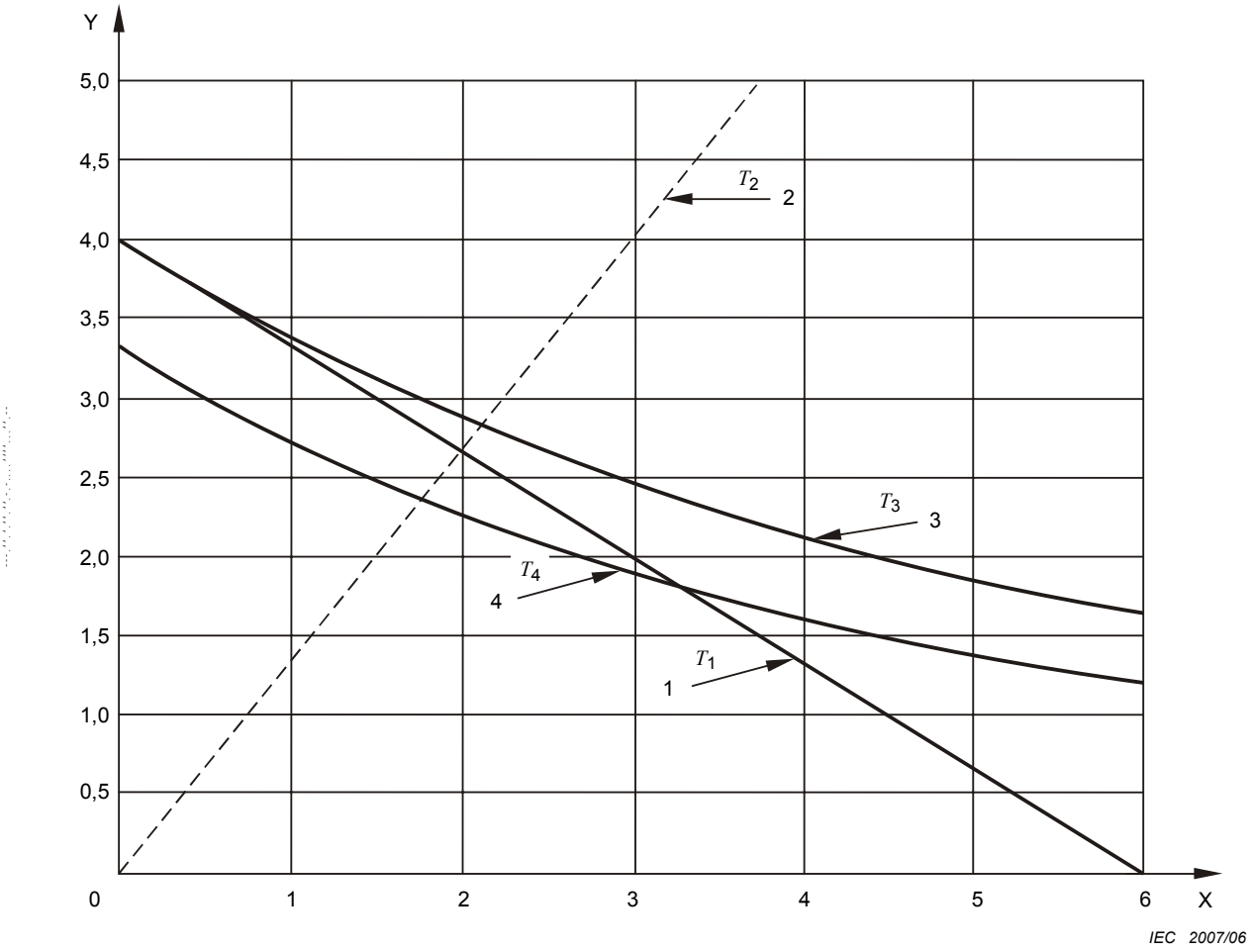
C.2.2 Minimum separation distance

An additional factor which should be taken into account is the minimum separation distance required to achieve acceptable far-field conditions, given by:

$$d > \frac{a_1^{\,2} + a_2^{\,2} + a_1 a_2}{\lambda}; \quad d > 5a_1 \quad \text{and} \quad d > 5a_2 \tag{C.2}$$

where λ is the wavelength at the highest frequency of measurement. This provides a limit on the minimum separation distance between the transducers.

For measurement of directional responses, the minimum separation distance requirements are more stringent and a distance of at least twice the above minimum is recommended, see 8.3 [41], [42].



Key

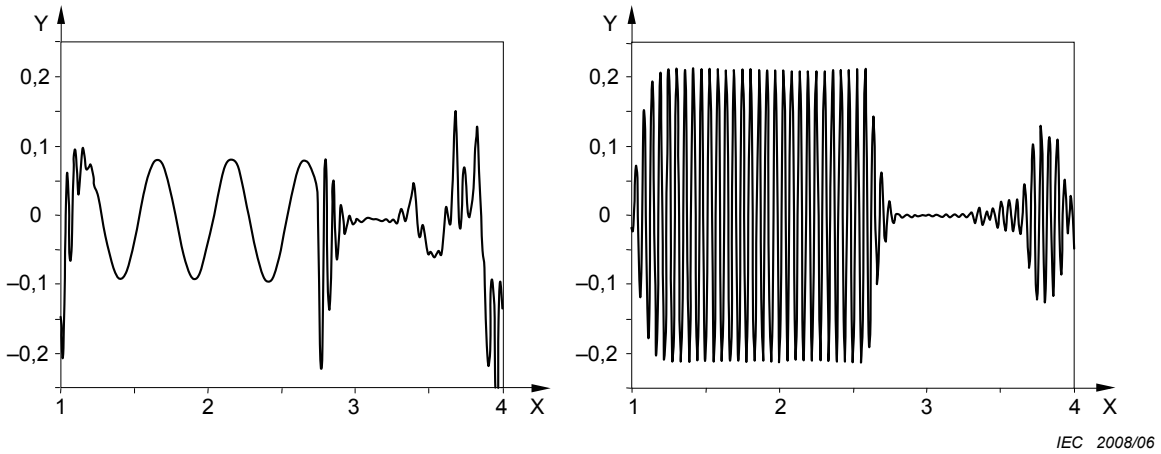
1 End wall reflections
2 Reflections between transducers
3 Side wall reflection
4 Surface and bottom reflections
X Separation in metres
Y Echo arrival time in milliseconds

Figure C.2 – Echo arrival time in a 6 m × 6 m × 5 m tank with optimally placed transducers

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.3 Transitoires d'enclenchement

En plus des réflexions du signal transmis provenant des parois de la cuve et du sol, et de la surface de l'eau, le signal de l'hydrophone est également contaminé par les transitoires dues au comportement en résonance des dispositifs. A partir du signal échantillonné, une estimation de l'amplitude en régime permanent du signal de l'hydrophone est nécessaire. La Figure C.3 représente des exemples types de signaux d'hydrophones mesurés au cours d'un étalonnage, présentant les transitoires d'enclenchement, la région de régime permanent et l'arrivée des premières réflexions. Aux fréquences basses, il y a moins de cycles complets du signal transmis à l'intérieur de la région de régime permanent. Par conséquent, une mesure directe de la partie en régime permanent du signal reçu est moins fiable, et ceci impose finalement une limite inférieure sur la gamme de fréquences dans laquelle les hydrophones peuvent être étalonnés.



Légende

X Temps (ms)

Y Voltage (V)

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))

Si le temps sans écho pour une cuve particulière avec des transducteurs positionnés de façon optimale est indiqué par T, le nombre de cycles disponibles pour l'analyse avant l'arrivée des réflexions est alors égal au produit fT, où f est la fréquence d'excitation.

Si ces cycles doivent être utilisés pour l'analyse, il convient d'atteindre les conditions de régime permanent. Les transducteurs électroacoustiques utilisés en acoustique sous-marine sont généralement des dispositifs résonants de facteur de qualité Q. Pour des dispositifs de ce type, il faut Q cycles de la fréquence de résonance pour que le signal atteigne environ 96 % de sa valeur finale en régime permanent. Par conséquent, il faudra environ Q cycles de la fréquence de résonance avant que les transitoires d'enclenchement initiales aient presque complètement disparu, même lorsque le projecteur est entraîné hors résonance. Pour les situations où $Q > fT$, de sorte que le régime permanent ne soit pas atteint dans le temps libre disponible, il n'est pas possible de réaliser une mesure directe du signal en régime permanent.

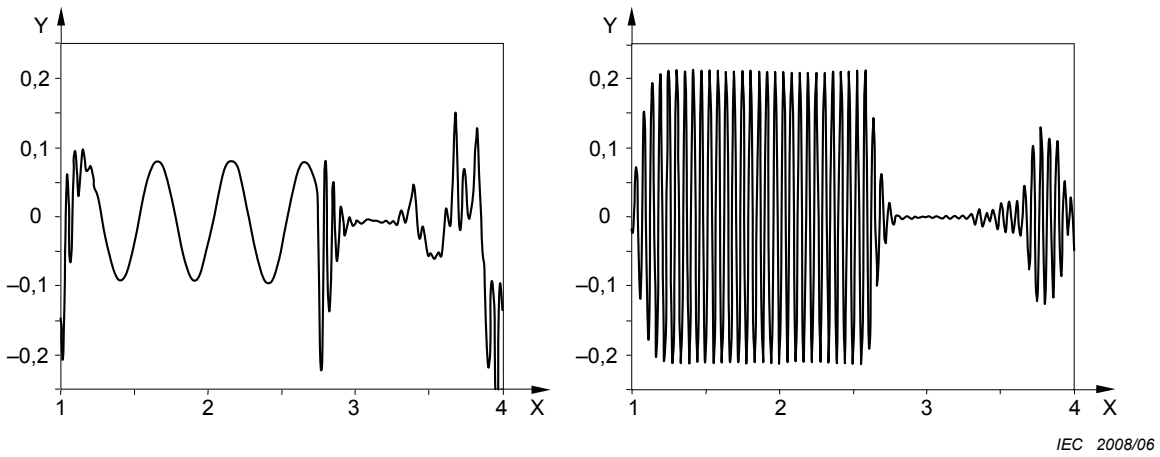
Noter que le comportement transitoire observé dans le signal dépendra également des facteurs Q d'autres éléments dans le système de mesure. Si l'hydrophone de réception a une résonance proche de la fréquence de mesure, ceci influencera la forme de la forme d'onde. De même, si un appareil de mesure quelconque (amplificateur, filtre, etc.) affiche tout comportement en résonance dans la bande de fréquences, ceci influencera également le comportement transitoire.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.3 Turn-on transients

In addition to reflections of the transmitted signal from the tank walls and floor, and the water surface, the hydrophone signal is also contaminated by transients due to the resonant behaviour of the devices. From the sampled signal, an estimate of the steady-state amplitude of the hydrophone signal is required. Figure C.3 shows typical examples of hydrophone signals measured during a calibration showing the turn-on transients, steady-state region and the arrival of the first reflections. At low frequencies, there are fewer complete cycles of the transmitted signal within the steady-state region. Consequently, direct measurement of the steady state portion of the received signal is less reliable, and ultimately this imposes a lower bound on the range of frequencies over which hydrophones may be calibrated.



Key

X Time (milliseconds)

Y Voltage (volts)

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))

If the echo-free time for a particular tank with transducers optimally positioned is denoted by T, then the number of cycles available for analysis before the arrival of reflections is equal to the product fT, where f is the frequency of excitation.

If these cycles are to be used for analysis, steady-state conditions should be reached. The electroacoustic transducers used in underwater acoustics are typically resonant devices of quality-factor Q. For such devices, it takes Q cycles of the resonance frequency for the signal to reach approximately 96 % of its final steady-state value. Therefore, it will take approximately Q cycles of the resonance frequency before the initial turn-on transients have almost completely died away, even when the projector is driven off-resonance. For situations where $Q > fT$, so that steady-state is not reached within the free-time available, it is not possible to make a direct measurement of the steady-state signal.

Note that the transient behaviour observed in the signal will also depend on the Q factors of other items in the measuring system. If the receiving hydrophone has a resonance close to the frequency of measurement, this will influence the waveform shape. Similarly, if any measuring instrument (amplifier, filter, etc.) displays any resonant behaviour in the frequency range, this will also influence the transient behaviour.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D'après les arguments ci-dessus, on peut se rendre compte que, pour toute dimension donnée de la cuve, il y aura une fréquence (en fonction du facteur Q du transducteur) où l'utilisation précise des techniques de mesure conventionnelles devient impossible [1], [2], [12], [38] et [69].

C.2.4 Considérations relatives à la largeur de bande

L'inconvénient majeur de la technique par impulsions réside dans le fait qu'une impulsion se compose d'un spectre de fréquences, tandis qu'un signal sinusoïdal continu ne comporte qu'une seule fréquence. La transmission sans distorsion d'une impulsion à travers l'amplificateur d'émission, le projecteur sonore, l'hydrophone et le système de réception nécessite une large bande et une réponse constante de l'ensemble du système au-dessus et en dessous de la fréquence du signal de mesure. Quelques écarts par rapport aux conditions idéales existeront toujours [1], [70] et [71].

L'impulsion émise est généralement une impulsion rectangulaire modulant la fréquence porteuse, qui est la fréquence de mesure. Pour les mesures, il convient que la largeur de bande de l'ensemble du système représente de deux à vingt fois la réciproque de la durée d'impulsion. Une largeur de bande qui représente environ deux fois la réciproque de la durée d'impulsion donnera un rapport signal sur bruit maximal. L'amplitude de l'enveloppe d'impulsion sera de 2 dB au-dessus de l'amplitude d'une impulsion carrée émise avec une largeur de bande représentant vingt fois la réciproque de la durée d'impulsion. Une largeur de bande représentant deux fois la réciproque de la durée d'impulsion est parfois désignée comme la largeur de bande fondamentale. L'application d'un moyennage de signal sur des impulsions sonores répétées peut améliorer considérablement le rapport signal sur bruit.

C.2.5 Diaphonie électrique

Lorsque des signaux impulsionnels sont utilisés, la diaphonie électrique peut être identifiée facilement (et éliminée) par des fenêtres de temps, étant donné qu'elle arrivera au niveau du récepteur essentiellement instantanément, sans le délai observé pour la propagation du signal acoustique. Afin d'éviter les interférences lorsque la diaphonie électrique est présente, il convient que la durée de l'impulsion ne soit pas supérieure au temps de propagation acoustique, de sorte que les deux signaux ne puissent pas se chevaucher dans le temps.

C.2.6 Durée de l'impulsion

D'après les considérations exposées ci-dessus, il convient que la durée de l'impulsion τ satisfasse aux conditions suivantes [12]:

a) $\tau \leq T_n$ de sorte que le signal direct soit séparé des signaux réfléchis.

b) $\tau \geq Q / f$ de sorte qu'un régime permanent soit obtenu.

c) $\tau \leq d / c$ de sorte que le signal direct soit séparé de la diaphonie électrique.

d) $\tau \geq 2 / W$ de sorte que le signal direct soit non déformé. W représente ici la largeur de bande du système de mesure global incluant les transducteurs.

C.2.7 Réverbération et fréquence de répétition des impulsions

Avec des signaux impulsionnels, il est nécessaire de choisir une fréquence de répétition des impulsions suffisamment faible pour que toute réverbération dans la cuve disparaisse avant la transmission de la prochaine impulsion [1]. Pour vérifier la réverbération, il convient d'observer le signal de réception sur un oscilloscope et de vérifier qu'aucun signal n'est présent à la fréquence de mesure pendant la durée précédant immédiatement la transmission de l'impulsion.

Les fréquences de répétition des impulsions utilisées dans les étalonnages acoustiques sous-marins dans les cuves d'essai se trouvent généralement dans la gamme allant de quelques hertz à peut-être 100 Hz, avec des durées d'impulsions variant de moins de 0,1 ms à 10 ms en fonction de la fréquence du signal et du temps sans écho disponible. Une valeur faible de fréquence de répétition des impulsions peut être nécessaire à des fréquences de signaux basses si la réverbération doit être évitée.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

By the above arguments, it can be seen that for any given size of tank, there will be a frequency (depending on the transducer Q-factor) where the accurate use of conventional measurement techniques becomes impossible [1], [2], [12], [38] and [69].

C.2.4 Bandwidth considerations

The chief disadvantage of the pulsing technique is that a pulse consists of a spectrum of frequencies whereas a continuous sinusoidal signal contains only one frequency. Undistorted transmission of a pulse through the transmitting amplifier, sound projector, hydrophone and receiving system requires a broad band and constant overall system response above and below the measuring signal frequency. Some variation from the ideal conditions will always exist [1], [70] and [71].

The transmitted pulse is generally a rectangular pulse modulating the carrier frequency, which is the measurement frequency. For measurement purposes, the bandwidth of the overall system should be two to twenty times the reciprocal of the pulse duration. A bandwidth that is approximately twice the reciprocal of the pulse duration will yield a maximum signal-to-noise ratio. The amplitude of the pulse envelope will be 2 dB above the amplitude of a square pulse transmitted by the bandwidth of twenty times the reciprocal of the pulse duration. A bandwidth that is twice the reciprocal of the pulse duration is sometimes referred to as the essential bandwidth. The application of signal averaging over repeated tone bursts can improve the signal to noise ratio considerably.

C.2.5 Electrical cross-talk

When pulsed signals are used, the electrical cross-talk may be easily identified (and eliminated) by time-windowing since it will arrive at the receiver essentially instantaneously without the time delay observed for propagation of the acoustic signal. In order to avoid interference when electrical cross-talk is present, the pulse duration should not be greater than the acoustic propagation delay, so that the two signals cannot overlap in time.

C.2.6 Pulse duration

Based on the considerations discussed above, the pulse duration τ should satisfy the following conditions [12]:

a) $\tau \leq T_n$ so that the direct signal is separated from the reflected signals.

b) $\tau \geq Q / f$ so that steady state is reached.

c) $\tau \leq d / c$ so that the direct signal is separated from the electrical cross-talk.

d) $\tau \geq 2 / W$ so that the direct signal is undistorted. Here W is the bandwidth of the overall measurement system including the transducers.

C.2.7 Reverberation and pulse repetition rate

With pulsed signals, it is necessary to choose a pulse repetition rate which is low enough for all reverberation in the tank to die away before transmission of the next pulse [1]. To check for reverberation, the receive signal on an oscilloscope should be observed and it should be checked that there is no signal present at the frequency of measurement during the time immediately before the pulse is transmitted.

The pulse repetition rates used in underwater acoustic calibrations in test tanks are generally in the range of a few hertz to perhaps 100 Hz with pulse durations varying from less than 0,1 ms to 10 ms depending on signal frequency and available echo-free time. A low value of pulse repetition rate may be required at low signal frequencies if reverberation is to be avoided.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.8 Dimensions types de la cuve

Les dimensions types des cuves utilisées pour l'étalonnage des transducteurs acoustiques sous-marins ont des dimensions minimales de 4 m ou 5 m, avec la fréquence de mesure la plus basse étant de 1 kHz ou 2 kHz (pour les transducteurs avec une valeur Q faible). A partir de C.2.1 à C.2.6, on peut se rendre compte que plus la cuve est petite, plus la fréquence limite inférieure sera élevée. En général, la dimension la plus petite de la cuve est souvent la profondeur. Dans certaines installations, les absorbeurs sont utilisés sur une ou plusieurs surfaces internes pour réduire le temps de réverbération.

Des cuves plus petites ayant des dimensions minimales d'environ 1 m sont souvent utilisées pour l'étalonnage à des fréquences élevées (centaines de kilohertz) [1], [12], [38].

C.2.9 Limites de haute fréquence

La limite de haute fréquence est régie par un certain nombre de facteurs. La distance de séparation minimale requise permettant à des conditions de champ lointain acoustique adaptées d'exister pour un couple spécifique de transducteurs augmente avec la fréquence (voir équation C.2).

Cependant, en utilisant des signaux d'impulsion sonore, le fait d'augmenter la distance de séparation entre les transducteurs aura tendance à réduire le temps sans écho disponible pour les mesures avant l'arrivée de signaux réfléchis provenant des limites de la cuve. Une réduction significative du temps sans écho réduira la fenêtre de temps disponible pour l'observation du signal en régime permanent.

L'affaiblissement du son dû à l'absorption dans l'eau augmente rapidement avec la fréquence, atteignant environ 0,25 dB/m à 1 MHz pour l'eau douce et 0,4 dB/m pour l'eau de mer [46].

En général, une combinaison des facteurs ci-dessus aura tendance à déterminer la limite de haute fréquence pour les étalonnages. Aux fréquences supérieures à 0,5 MHz, il convient de tenir compte de l'utilisation de la méthode alternative décrite dans la CEI 60866. Cette méthode alternative est une méthode à deux transducteurs, où la réponse à l'émission en courant d'un transducteur source est tout d'abord déterminée par la méthode d'auto-réciprocité utilisant une cible planaire réfléchissante dans des conditions approximativement d'ondes planes (nécessitant l'utilisation du paramètre de réciprocité de l'onde plane). Ce transducteur auxiliaire est ensuite utilisé pour étalonner l'hydrophone en essai par une méthode de projecteur étalonné. Cette méthode est adaptée aux transducteurs qui produisent des faisceaux étroits [1], [45], [46], voir la CEI 60866.

C.2.10 Limites de basse fréquence

La fréquence la plus basse pour les étalonnages est limitée par plusieurs facteurs.

En utilisant des signaux d'impulsion sonore dans les cuves d'essai de dimensions finies, le nombre de cycles de signaux en régime permanent disponibles pour la mesure dépend du facteur Q des transducteurs et du temps sans écho de la cuve d'essai (qui, successivement, dépend de la dimension de la cuve et de la séparation des transducteurs). La fréquence étant abaissée, le nombre de cycles dans la fenêtre de temps disponible est réduit jusqu'à ce que l'amplitude du signal en régime permanent ne puisse finalement plus être déterminée par des moyens conventionnels. Ceci fournit une fréquence limite inférieure sur les mesures effectuées à l'aide de signaux d'impulsion sonore.

De plus, le niveau de pression acoustique produit par le transducteur d'émission peut être réduit à mesure que la fréquence est diminuée, chutant finalement à une valeur inférieure à 20 dB au-dessus du niveau de bruit ambiant, limitant ainsi la fréquence minimale pour les étalonnages.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.8 Typical tank dimensions

Typical dimensions of tanks used for calibration of underwater acoustic transducers have minimum dimensions of 4 m or 5 m, with the lowest frequency of measurement being 1 kHz or 2 kHz (for low Q transducers). In C.2.1 to C.2.6, it can be seen that the smaller the tank, the higher will be the lower limiting frequency. In general, the smallest dimension of the tank is often the depth. In some facilities, absorbers are used on one or more internal surfaces to reduce reverberation time.

Smaller tanks of minimum dimension about 1 m are often used for calibration at high frequencies (hundreds of kilohertz) [1], [12], [38].

C.2.9 High-frequency limitations

The high frequency limit is governed by a number of factors. The minimum separation distance required permitting suitable acoustic far-field conditions to exist for a specific transducer pair increases with frequency (see equation C.2).

However, when using tone-burst signals, increasing the transducer separation distance will tend to reduce the echo-free time available for measurements before the arrival of reflected signals from the tank boundaries. A significant reduction in echo-free time will restrict the time window available for observation of the steady-state signal.

The attenuation of sound due to absorption in the water increases rapidly with frequency, reaching about 0,25 dB/m at 1 MHz for fresh water and 0,4 dB/m for seawater [46].

In general, a combination of the above factors will tend to determine the high frequency limit for calibrations. At frequencies above 0,5 MHz, consideration should be given to use of the alternative method described in IEC 60866. This alternative method is a two-transducer method, where the transmitting current response of a source transducer is first determined by the self-reciprocity method using a reflective planar target under approximately plane-wave conditions (requiring the plane-wave reciprocity parameter to be used). This auxiliary transducer is then used to calibrate the hydrophone under test by a calibrated projector method. This method is suited to transducers that produce narrow beams [1], [45], [46], see IEC 60866.

C.2.10 Low frequency limitations

The lowest frequency for calibrations is limited by several factors.

When using tone-burst signals in finite-sized test tanks, the number of cycles of steady state signal available for measurement depends on the Q factor of the transducers and the echo-free time of the test tank (which in turn depends upon tank size and transducer separation). As the frequency is lowered, the number of cycles in the available time-window is reduced until eventually the steady-state signal amplitude can no longer be determined by conventional means. This provides a lower limiting frequency on measurements made using tone-burst signals.

In addition, the sound pressure level produced by the transmitting transducer may be reduced as the frequency is lowered, eventually falling to where it is less than 20 dB above the ambient noise level thereby limiting the minimum frequency for calibrations.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE Pour un transducteur piézo-électrique utilisé bien en dessous de la fréquence de résonance la plus basse, l'émission de la pression acoustique à un courant constant est proportionnelle à la fréquence. Pour un transducteur électrodynamique, l'émission de la pression acoustique à un courant d'attaque constant diminue proportionnellement au carré de la fréquence bien en dessous de la première résonance (bien que la réponse soit relativement constante entre la première et la deuxième résonance).

La distance de séparation minimale pour une taille de transducteur donnée aux basses fréquences est donnée par l'équation (C.2).

En général, une combinaison des facteurs ci-dessus aura tendance à déterminer la limite de basse fréquence pour les étalonnages. Pour la plupart des grandes cuves d'essai ayant une dimension minimale de 5 m ou plus, la limite de basse fréquence pour l'étalonnage des hydrophones sera en pratique de l'ordre de 1 kHz ou 2 kHz [38], [69].

C.2.11 Vérification de l'onde sphérique

L'existence d'un champ acoustique à propagation sphérique peut être vérifiée par comparaison des modules de l'impédance électrique de transfert lorsque la distance entre le projecteur et l'hydrophone est modifiée. Pour un champ à propagation sphérique, il convient que le produit du module de l'impédance électrique de transfert et de la distance de séparation ne varie pas avec la distance (voir 3.10, Note 4) [12].

Le degré auquel ce produit varie avec la distance est une indication de l'incertitude qui peut être liée à ce facteur. Dans des conditions idéales, il convient qu'il soit possible d'obtenir une variation inférieure à ±2 %. Une variation de plus de ±5 % peut indiquer des problèmes supplémentaires (par exemple à partir des réflexions limites) et il convient qu'elle soit examinée davantage.

C.2.12 Mise en évidence des effets d'interférence

NOTE 1 Lorsque des ondulations périodiques lisses peuvent être observées sur un tracé de l'impédance électrique de transfert (ou de la sensibilité) en fonction de la fréquence, il s'agit d'une indication selon laquelle il peut y avoir des réflexions acoustiques présentes, entraînant des effets d'interférence constructifs et destructifs.

Si l'intervalle de fréquence entre les crêtes successives dans le tracé est Δf, la différence de trajet, Δd, entre les signaux directs et réfléchis arrivant au niveau de l'hydrophone, est calculée par:

$$\Delta d = \frac{c}{\Delta f} \qquad \text{(C.3)}$$

où c est la vitesse du son [1].

NOTE 2 La différence de trajet peut être utilisée pour trouver la source des signaux réfléchis.

Il convient que l'on veille à s'assurer que les interférences provenant de la diaphonie électrique ne soient pas présentes au cours des mesures. Lorsque des signaux d'impulsion sonore sont utilisés, il convient que la diaphonie soit identifiée facilement (et éliminée) par des fenêtres de temps, étant donné qu'elle arrivera au niveau du récepteur essentiellement instantanément, sans le délai observé pour la propagation du signal acoustique. Afin d'éviter les interférences lorsque la diaphonie électrique est présente, il convient que la durée de l'impulsion sonore ne soit pas supérieure au temps de propagation acoustique, de sorte que les deux signaux ne puissent pas se chevaucher dans le temps.

Avec des signaux d'impulsion sonore, il convient qu'une fréquence de répétition d'impulsion sonore soit choisie et soit suffisamment faible pour que toute réverbération dans la cuve disparaisse avant la transmission de la prochaine impulsion. Pour vérifier la réverbération, il convient que le signal de réception sur un oscilloscope soit observé et vérifié pour s'assurer qu'aucun signal n'est présent à la fréquence de mesure pendant la durée précédant immédiatement la transmission de l'impulsion sonore.

NOTE 3 L'utilisation de dispositifs de réduction d'écho pour une ou plusieurs parois de la cuve réduira le temps de réverbération et permettra l'utilisation d'une fréquence de répétition des impulsions sonores plus élevée [1], [2].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE For a piezoelectric transducer used well below the lowest resonance frequency, the sound pressure output at a constant current is proportional to the frequency. For an electrodynamic transducer, the sound pressure output at constant drive current decreases proportionally with the square of the frequency well below the first resonance (although the response is relatively constant between the first and second resonances).

The minimum separation distance for a given transducer size at low frequencies is given by equation (C.2).

In general, a combination of the above will tend to determine the low frequency limit for calibrations. For most large test tank facilities of minimum dimension 5 metres or greater, the practical low frequency limit for calibration of hydrophones will be of the order of 1 kHz or 2 kHz [38], [69].

C.2.11 Spherical-wave verification

The existence of a spherically-spreading acoustic field may be verified by comparison of the electrical transfer impedance magnitudes when the distance between projector and hydrophone is varied. For a spherically-spreading field, the product of the electrical transfer impedance magnitude and separation distance should be invariant with distance (see 3.10, Note 4) [12].

The degree to which this product varies with distance is an indication of the uncertainty that may be ascribed to this factor. In ideal conditions, it should be possible to obtain variation of less than ±2 %. Variation of greater than ±5 % may indicate additional problems (e.g. from boundary reflections) and should be investigated further.

C.2.12 Evidence of interference effects

NOTE 1 Where smooth periodic ripples can be observed in a plot of electrical transfer impedance (or sensitivity) against frequency, this is an indication that acoustic reflections are likely to be present leading to constructive and destructive interference effects.

If the frequency interval between successive peaks in the plot is Δf, the path difference, Δd, between the direct and reflected signals arriving at the hydrophone should be calculated by:

$$\Delta d = \frac{c}{\Delta f} \tag{C.3}$$

where c is the speed of sound [1].

NOTE 2 The path difference may be used to trace the source of reflected signals.

Care should be taken to ensure that interference from electrical cross-talk is not present during measurements. When tone-burst signals are used, the cross-talk should be easily identified (and eliminated) by time-windowing since it will arrive at the receiver essentially instantaneously without the time delay observed for the propagation of the acoustic signal. In order to avoid interference when electrical cross-talk is present, the tone-burst duration should not be greater than the acoustic propagation delay, so that the two signals cannot overlap in time.

With tone-burst signals, a tone-burst repetition rate should be chosen that is low enough for all reverberation in the tank to die away before transmission of the next pulse. To check for reverberation, the receive signal on an oscilloscope should be observed and checked to ensure that there is no signal present at the frequency of measurement during the time immediately before the tone burst is transmitted.

NOTE 3 Use of echo-reducing treatments for one or more of the walls of the tank will reduce the reverberation time and allow the use of a higher tone-burst repetition rate [1], [2].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.3 Méthodes d'analyse pour les signaux d'impulsion sonore

Dans le cas où il y a suffisamment de temps sans écho avant l'arrivée des premiers échos pour que le signal en régime permanent puisse être observé directement, un certain nombre de méthodes différentes peut être utilisé pour faire une estimation de l'amplitude en régime permanent. Une fenêtre de temps ou une porte est généralement appliquée à la forme d'onde numérisée, de sorte que seule une région choisie du signal en régime permanent soit mise à disposition pour l'analyse. Les méthodes de mesure de l'amplitude de la composante en régime permanent sont les suivantes.

a) En effectuant une mesure directe de la tension crête en mesurant les valeurs maximale et minimale du signal numérisé (ou par un détecteur de crête).

b) En calculant la tension efficace (en élevant au carré, en faisant la moyenne et en faisant la racine carrée du signal numérisé). Ceci est effectué idéalement en utilisant un nombre entier de cycles du signal sinusoïdal.

c) En réalisant une transformée de Fourier rapide (FFT; en anglais fast Fourier transform) du signal et en relevant l'amplitude du spectre à la fréquence de fonctionnement, en utilisant à nouveau un nombre entier de cycles.

d) En réalisant une transformée de Fourier discrète (DFT; en anglais discrete Fourier transform) à « bande étroite » du signal, en calculant uniquement l'amplitude de la composante à la fréquence de fonctionnement, en utilisant à nouveau un nombre entier de cycles.

e) En réalisant une méthode des moindres carrés d'une onde sinusoïdale de la fréquence appropriée et en relevant l'amplitude de l'enveloppe sinusoïdale.

Toutes les méthodes ci-dessus présentent des points forts et des faiblesses. La mesure crête de a) est simple à mettre en œuvre mais imprécise en présence de bruit, de déformation et de fluctuations d'amplitude résiduelles éventuels de l'enveloppe de la forme d'onde. Les autres méthodes nécessitent un traitement un peu plus élaboré, peut-être avec des algorithmes de logiciels spécialisés. Cependant, les méthodes b) à e) fourniront un certain moyennage efficace des petites variations d'amplitude si de nombreux cycles sont contenus dans la fenêtre de temps. Les méthodes c) à e) fourniront aussi une certaine discrimination contre le bruit et peuvent également donner des informations sur la phase et l'amplitude. Néanmoins, des erreurs peuvent se produire avec les méthodes b) à d) si un nombre entier de cycles n'est pas utilisé pour l'analyse. De même, avec la transformée de Fourier rapide de la méthode c), une erreur peut être introduite si le spectre ne contient pas un point à la fréquence exacte d'excitation. Les deux méthodes d) et e) peuvent toujours fournir une précision acceptable, même en analysant uniquement un demi-cycle du signal [69].

Lorsqu'une analyse sur place automatique est entreprise à l'aide d'oscilloscopes de numérisation ou d'analyseurs de formes d'ondes, il convient de veiller à s'assurer que l'analyse sur place donne des résultats précis [1], [2], [12], [38] et [69].

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.3 Analysis methods for tone-burst signals

In the case where there is enough echo free-time before the arrival of the first echoes for the steady-state signal to be observed directly, a number of different methods may be employed to make an estimate of the steady-state amplitude. Typically, a time-window or gate is applied to the digitized waveform so that only a selected region of the steady-state signal is made available for analysis. Methods of measuring the amplitude of the steady-state component follow.

a) Direct measurement of the peak voltage by measuring the maximum and minimum of the digitized signal (or by a peak detector).

b) Calculating the RMS voltage (by squaring, averaging and square rooting the digitized signal). Ideally, this is done using an integer number of cycles of the sinusoidal signal.

c) Performing a fast Fourier transform (FFT) of the signal and taking the amplitude of the spectrum at the drive frequency, again using an integer number of cycles.

d) Performing a 'narrow-band' discrete Fourier transform (DFT) of the signal, calculating only the amplitude of the component at the drive frequency, again using an integer number of cycles.

e) Performing a least-squares fit of a sine-wave of the appropriate frequency and taking the amplitude of the fitted sine-curve.

All the above methods have strengths and weaknesses. The peak measurement of a) is simple to implement but inaccurate in the presence of any noise, distortion and residual amplitude fluctuations of the waveform envelope. The other methods need a little more processing, perhaps with dedicated software algorithms. However, methods b) to e) will provide some effective averaging of small amplitude variations if many cycles are contained within the time window. Methods c) to e) will also provide some discrimination against noise and can also provide information on phase as well as amplitude. However, errors may occur with methods b) to d) if an integer number of cycles is not used for the analysis. Also, with the FFT of method c), an error may be introduced if the spectrum does not contain a point at the exact frequency of excitation. Both methods d) and e) can still provide acceptable accuracy even when analysing only half a cycle of signal [69].

Where automatic on-board analysis is undertaken using digitizing oscilloscopes or waveform analysers, care should be taken to ensure that the on-board analysis produces accurate results [1], [2], [12], [38] and [69].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe D
(informative)

Evaluation de l'incertitude dans l'étalonnage des hydrophones

D.1 Généralités

Pour être réellement significatif, il convient que le résultat d'un étalonnage soit accompagné de son incertitude associée [3].

En général, les facteurs d'incertitude sont regroupés selon la manière dont les valeurs sont estimées:

Type A: évaluation par des moyens statistiques;

Type B: évaluation par d'autres moyens.

D.2 Evaluation d'incertitude de type A

Celle-ci peut être obtenue à partir d'une analyse statistique de la répétabilité des étalonnages.

Idéalement, il convient que les mesures répétées soient des répétitions réellement indépendantes, les hydrophones étant retirés de l'eau et remontés avant que l'étalonnage ne soit répété.

Lorsqu'il n'est pas réalisable d'entreprendre des répétitions indépendantes, et lorsque des données historiques existent pour la répétabilité des mesures avec les dispositifs en question, les valeurs de répétabilité type pour l'étalonnage d'un hydrophone peuvent être utilisées.

Il convient que cette évaluation suive une évaluation de type B.

D.3 Evaluation d'incertitude de type B

Les facteurs d'incertitude de type B sont ceux qui ne sont pas évalués par des moyens statistiques, en d'autres termes les facteurs qui restent constants lorsque la mesure est répétée. Par exemple, toute erreur systématique dans une mesure peut être considérée comme une contribution de type B. De même, l'incertitude dans l'étalonnage d'un appareil étalonné fournit une contribution de type B.

Il convient que les sources de ces facteurs soient identifiées en évaluant toutes les influences qui peuvent introduire une incertitude dans la mesure. Celles-ci seront différentes pour chaque système de mesure et il convient qu'elles soient évaluées individuellement. Il convient que la valeur de chaque facteur soit estimée avec une distribution de probabilité associée.

D.4 Incertitude déclarée

Il convient que l'incertitude combinée soit obtenue à partir des facteurs individuels [3]. Il convient que tous les facteurs soient exprimés comme des incertitudes types avant d'être combinés. La méthode utilisée pour combiner les facteurs nécessite la formulation d'un modèle qui établit un rapport entre le résultat de l'étalonnage et toutes les grandeurs qui sont mesurées ou soumises à l'incertitude.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex D
(informative)

Assessment of uncertainty in the calibration of hydrophones

D.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated uncertainty [3].

In general, uncertainty components are grouped according to how the values are estimated:

Type A: evaluated by statistical means,
Type B: evaluated by other means.

D.2 Type A evaluation of uncertainty

This may be obtained from a statistical analysis of the repeatability of the calibrations.

Ideally, the repeated measurements should be truly independent repeats, with the hydrophones removed from the water and remounted before the calibration is repeated.

Where it is not feasible to undertake independent repeats, and where historical data exist for the repeatability of the measurements with the devices in question, values for the typical repeatability for calibration of a hydrophone may be used.

This assessment should follow a type B evaluation.

D.3 Type B evaluation of uncertainty

Type B components of uncertainty are those that are not assessed by statistical means, in other words those components that remain constant when the measurement is repeated. For example, any systematic bias in a measurement may be regarded as a Type B contribution. Similarly, the uncertainty in the calibration of a calibrated instrument provides a Type B contribution.

The sources of these components should be identified by assessing all of the influences which may introduce uncertainty into the measurement. These will be different for each measurement system and should be assessed individually. The value of each component should be estimated along with an associated probability distribution.

D.4 Reported uncertainty

The combined uncertainty should be obtained from the individual components [3]. All components should be expressed as standard uncertainties before being combined. The method used to combine the components requires the formulation of a model that relates the result of the calibration to all quantities that are measured or subject to uncertainty.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En établissant l'incertitude déclarée, il convient qu'elle soit exprimée comme l'incertitude étendue. Dans ce cas, il convient que le niveau de confiance et le coefficient de couverture soient également indiqués.

En combinant les facteurs d'incertitude, il convient de prendre des précautions lorsque les valeurs des facteurs sont exprimées en décibels. Avant la combinaison, il convient que les valeurs soient idéalement exprimées sous forme linéaire (par exemple en pourcentage) et non en décibels (dB). La valeur finale de l'incertitude étendue peut être exprimée en pourcentage ou être convertie en décibels, selon ce qui est exigé.

NOTE 1 Il convient de se rendre compte que l'utilisation de décibels pour exprimer les incertitudes peut conduire à des distributions asymétriques (par exemple, une valeur de +1,5 dB est équivalente à +19 %, mais une valeur de –1,5 dB est équivalente à –16 %).

NOTE 2 Lorsque chaque facteur d'incertitude est faible, c'est-à-dire bien inférieur à 1 dB, l'incertitude combinée peut être calculée en utilisant des décibels.

D.5 Sources communes d'incertitude

La liste suivante énumère les sources communes d'incertitude dans l'étalonnage des transducteurs acoustiques sous-marins. La liste n'est pas exhaustive, mais peut être utilisée comme un guide en évaluant les incertitudes pour une mise en œuvre spécifique d'une méthode d'étalonnage. En fonction de la méthode d'étalonnage choisie et de sa mise en place, une partie de ces sources nécessitera une évaluation. Par exemple, l'incertitude provenant des appareils de mesure peut être réduite par l'utilisation du même canal de mesure (amplificateur, filtre, voltmètre, etc.) pour tous les signaux et en mesurant uniquement les rapports d'amplitude. Cependant, étant donné que ceci peut ne pas être le cas dans toutes les installations, les facteurs pour ces sources d'incertitude ont été inclus dans la liste.

Une fois que les sources d'incertitude ont été identifiées, chacune nécessite une évaluation par une évaluation de type A ou une évaluation de type B. Dans la plupart des cas, pour les facteurs énumérés ci-dessous, une évaluation de type B est la plus appropriée. Cependant, lorsqu'un paramètre a été estimé à partir de mesures répétées (on peut prendre comme exemple la mesure de la distance de séparation dans un étalonnage par réciprocité), une évaluation de type A peut aussi être nécessaire.

Sources d'incertitude spécifiques aux étalonnages par réciprocité en champ libre [1], [8], [12]:

- incertitude de toutes les hypothèses relatives au champ acoustique, par exemple que le champ est un champ d'onde sphérique (ceci peut être vérifié en faisant varier la distance de séparation entre les transducteurs et en vérifiant que le produit de l'impédance électrique de transfert et de la distance ne varie pas, voir 8.6.4);
- comportement non réciproque par les transducteurs (peut être évalué en vérifiant l'équivalence des impédances électriques de transfert Z_{PT} et Z_{TP}, voir 8.6.6);
- incertitudes dans la mesure de la distance de séparation;
- incertitudes dans les valeurs de la fréquence acoustique (nécessaire pour calculer le paramètre de réciprocité);
- incertitude dans la valeur de la densité de l'eau (nécessaire pour calculer le paramètre de réciprocité).

Sources d'incertitude spécifiques aux étalonnages par comparaison [1], [8], [12]:

- incertitudes dans l'étalonnage de l'hydrophone de référence (source majeure d'incertitude dans un étalonnage par comparaison);
- incertitude provoquée par l'instabilité à court terme de tous les transducteurs auxiliaires utilisés pour les étalonnages par comparaison (par exemple, instabilité de la sortie d'un transducteur utilisé comme projecteur dans un étalonnage par comparaison);

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

When stating the reported uncertainty, it should be expressed as expanded uncertainty. In this case, the level of confidence and the coverage factor should also be stated.

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

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

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

D.5 Common sources of uncertainty

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

Once the sources of uncertainty have been identified, each requires assessment by either a Type A or Type B evaluation. In most cases for the components listed below, a Type B evaluation is most appropriate. However, where a parameter has been estimated from repeated measurements (a possible example might be the measurement of separation distance in a reciprocity calibration), a Type A evaluation may also be required.

Sources of uncertainty specific to free-field reciprocity calibrations [1], [8], [12]:

- uncertainty of any assumptions about the acoustic field, e.g. that the field is a spherical-wave field (this may be checked by varying the separation distance between transducers and checking that the product of electrical transfer impedance and distance is invariant, see 8.6.4);
- non-reciprocal behaviour by transducers (can be evaluated by checking the equivalence of the Z_{PT} and Z_{TP} electrical transfer impedances, see 8.6.6);
- uncertainties in the measurement of the separation distance;
- uncertainties in the values for acoustic frequency (required to calculate the reciprocity parameter);
- uncertainty in the value for water density (required to calculate the reciprocity parameter).

Sources of uncertainty specific to comparison calibrations [1], [8], [12]:

- uncertainties in the calibration of the reference hydrophone (a major source of uncertainty in a comparison calibration);
- uncertainty caused by short-term instability of any auxiliary transducers used for comparison calibrations (e.g., instability of the output of a transducer used as a projector in a comparison calibration);

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

- incertitude provoquée par l'instabilité potentielle de l'hydrophone de référence dans les étalonnages par comparaison (c'est-à-dire, variation de la sensibilité du dispositif de référence depuis l'étalonnage absolu précédent);
- différences de conditions environnementales pour l'étalonnage par comparaison par rapport à celles qui étaient présentes au cours de l'étalonnage absolu de l'hydrophone de référence, ce qui provoquerait un changement de sensibilité pour l'hydrophone de référence (par exemple, température, profondeur, montage/assemblage, etc.).

Sources d'incertitude spécifiques à l'étalonnage de l'hydrophone par la méthode du projecteur étalonné [1], [8], [12]:

- incertitude de toutes les hypothèses relatives au champ acoustique produit par le projecteur, par exemple, que le champ est un champ d'onde sphérique (la méthode du projecteur étalonné est plus sensible au manque de conditions de champ libre que la comparaison avec un hydrophone étalonné, par exemple, en raison des interférences provenant des réflexions limites);
- incertitudes dans la mesure de la distance de séparation;
- manque de stabilité dans les conditions d'entraînement électrique du projecteur, y compris manque de linéarité si le projecteur est entraîné avec un signal différent de celui utilisé dans son propre étalonnage absolu;
- instabilité du projecteur étalonné (c'est-à-dire variation de sensibilité du dispositif de référence depuis l'étalonnage absolu précédent);
- différences de conditions environnementales pour l'étalonnage par rapport à celles qui étaient présentes au cours de l'étalonnage absolu du projecteur de référence, ce qui provoquerait un changement de sensibilité pour l'hydrophone de référence (par exemple, température, profondeur, montage/assemblage, etc.).

Sources d'incertitude communes à toutes les méthodes ci-dessus [1], [8], [12]:

- manque de conditions de régime permanent, en particulier lorsque des salves d'ondes acoustiques à une seule fréquence sont utilisées (la fréquence de résonance et les facteurs Q des transducteurs et le temps sans écho de la cuve influenceront cette contribution);
- interférences provenant des réflexions acoustiques, conduisant à un manque de conditions de champ libre;
- manque de conditions de champ lointain acoustique;
- effets du moyennage spatial des hydrophones en cours d'étalonnage en raison de leurs dimensions finies et du manque de conditions d'ondes planes parfaites;
- désalignement, en particulier aux fréquences élevées, où la réponse de l'hydrophone peut être loin d'être omnidirectionnelle;
- diffusion acoustique provenant du montage de l'hydrophone (ou vibrations détectées et conduites par le montage);
- incertitude dans la mesure de la tension de réception (y compris l'incertitude due aux appareils de mesure (voltmètre, numériseurs, etc.);
- incertitude des gains de tous les amplificateurs, filtres et numériseurs utilisés;
- incertitudes dans la mesure du courant ou de la tension d'attaque;
- incertitudes dues au manque de linéarité dans le système de mesure (l'utilisation d'un atténuateur étalonné pour égaliser les signaux mesurés peut réduire de façon significative cette contribution);
- incertitude de tous les atténuateurs de signaux électriques utilisés;
- le bruit électrique inclut les parasites RF;
- incertitude de toutes les corrections de charge électrique effectuées pour tenir compte de la charge par des câbles prolongateurs et des préamplificateurs;

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

- uncertainty caused by potential instability of the reference hydrophone in comparison calibrations (i.e., variation in the sensitivity of the reference device since the previous absolute calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference hydrophone, which would cause a change in sensitivity for the reference hydrophone (e.g. temperature, depth, mounting/rigging, etc.).

Sources of uncertainty specific to hydrophone calibration by calibrated projector method [1], [8], [12]:

- uncertainty of any assumptions about the acoustic field produced by the projector, e.g., that the field is a spherical-wave (the calibrated projector method is more sensitive to lack of free-field conditions than comparison with a calibrated hydrophone, e.g., due to interference from boundary reflections);
- uncertainties in the measurement of the separation distance;
- lack of stability in the projector electrical drive conditions, including lack of linearity if the projector is driven with a signal different than that used in its own absolute calibration;
- instability of the calibrated projector (i.e. variation in sensitivity of reference device since previous absolute calibration);
- differences in environmental conditions for the calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference projector which would cause a change in sensitivity for the reference hydrophone (e.g., temperature, depth, mounting/rigging, etc.).

Sources of uncertainty common to all above methods [1], [8], [12]:

- lack of steady-state conditions, especially where bursts of single-frequency sound waves are used (the resonance frequency and Q-factors of the transducers and the echo-free time of the tank will influence this contribution);
- interference from acoustic reflections, leading to a lack of free-field conditions;
- lack of acoustic far-field conditions;
- the spatial averaging effects of the hydrophones under calibration due to their finite size and the lack of perfect plane-wave conditions;
- misalignment, particularly at high frequencies where the hydrophone response may be far from omnidirectional;
- acoustic scattering from the hydrophone mount (or vibrations picked up and conducted by the mount);
- uncertainty in measurement of the receive voltage (including uncertainty due to the measuring instrumentation (voltmeter, digitizers, etc.);
- uncertainty of the gains of any amplifiers, filters, and digitizers used;
- uncertainties in the measurement of the drive current or voltage;
- uncertainties due to the lack of linearity in the measurement system (the use of a calibrated attenuator to equalize the measured signals may significantly reduce this contribution);
- uncertainty of any electrical signal attenuators used;
- electrical noise include RF pick-up;
- uncertainty of any electrical loading corrections made to account for loading by extension cables and preamplifiers;

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

- bulles ou air collés contre les transducteurs (il convient que ceci soit réduit par un mouillage et un trempage adéquats des transducteurs);
- conditions environnementales, telles que la température de l'eau et la profondeur d'immersion (il n'est pas nécessaire d'inclure les corrections pour ces conditions, si les résultats de l'étalonnage spécifient les conditions et établissent que l'étalonnage n'est valable que pour les conditions indiquées).

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

- bubbles or air clinging to transducers (this should be minimized by adequate wetting and soaking of transducers);
- environmental conditions, such as water temperature and depth of immersion (corrections need not be included for these if the calibration results specify the conditions and state that the calibration is only valid for the conditions stated).

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe E
(informative)

Circuit équivalent du système d'excitation pour l'étalonnage avec une colonne vibrante

E.1 Circuit équivalent

Aux fréquences où la longueur l de la colonne est inférieure au quart de la longueur d'onde, la colonne vibrante peut être représentée par un circuit équivalent, tel que présenté à la Figure E.1. La force est représentée par une tension, la masse par une inductance et l'élasticité par une capacité.

La variation de la profondeur de l'hydrophone est représentée par le déplacement du contact mobile sur la bobine m_w. Au point le plus bas de la bobine $(h = 0)$, l'hydrophone se trouve à la partie supérieure de la colonne. Un déplacement du contact vers le haut correspond à une immersion plus profonde de l'hydrophone.

L'élasticité de l'hydrophone est représentée par une impédance de charge électrique capacitive Z. A faible profondeur, cette charge n'aura aucune influence sur la tension de sortie équivalente pA du circuit.

On considère que la rigidité de l'hydrophone est suffisamment importante si son influence sur pA est infiniment petite à la profondeur opérationnelle h de l'hydrophone dans la colonne.

F_c est la force engendrée

m_c est la masse du récipient

$\dot{x}$ est la vitesse du mouvement vertical

C est l'élasticité réelle des parois du récipient

m_w est la masse du liquide

Z est l'impédance mécanique de l'hydrophone (essentiellement la rigidité)

A est la section transversale de la colonne de liquide

p est la pression acoustique au niveau de l'hydrophone

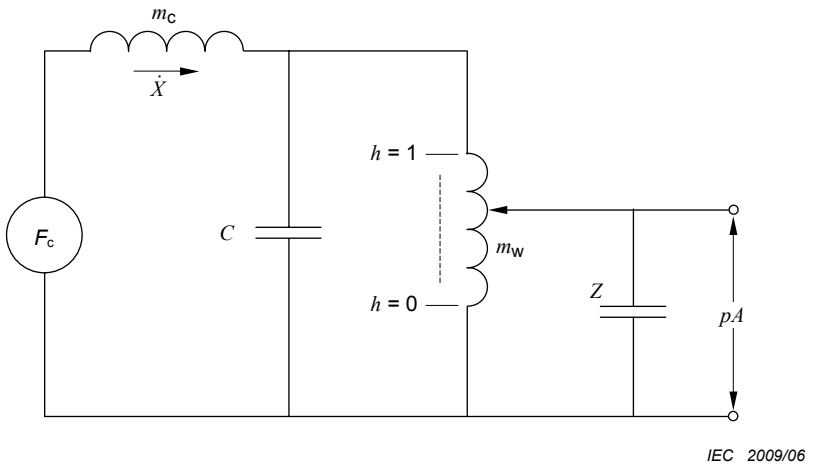


Figure E.1 – Circuit équivalent simplifié de la colonne vibrante

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex E
(informative)

Equivalent circuit of the excitation system for calibration with a vibrating column

E.1 Equivalent circuit

At frequencies where the length l of the column is less than a quarter of the wavelength, the vibrating column can be represented by an equivalent circuit as shown in Figure E.1. Force is represented by a voltage, mass by an inductance and compliance by capacitance.

Variation of the depth of the hydrophone is represented by displacement of the sliding contact on the coil m_w. At the lowest point on the coil $(h = 0)$, the hydrophone is at the top of the column. Upward movement of the contact slide corresponds to deeper immersion of the hydrophone.

The compliance of the hydrophone is represented by a capacitive electrical load impedance Z. At shallow depth, this load will have no influence on the equivalent output voltage pA of the circuit.

The stiffness of the hydrophone is said to be sufficiently large if its influence on pA is negligibly small at the operational depth h of the hydrophone in the column.

F_c is the generated force

m_c is the mass of the vessel

$\dot{x}$ is the velocity of the vertical motion

C is the effective wall compliance of the vessel

m_w is the mass of the liquid

Z is the mechanical impedance of the hydrophone (mainly stiffness)

A is the cross-sectional area of the liquid column

p is the sound pressure at the hydrophone

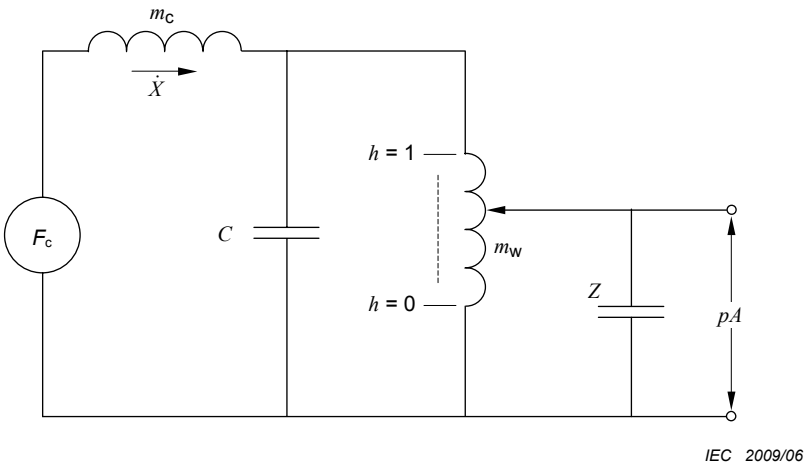


Figure E.1 – Simplified equivalent circuit of the vibrating column

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Bibliographie

1. BOBBER, R. J. *Underwater electroacoustic measurements*. Peninsula Press, Los Altos CA, 1988.
2. *Procedures for calibration of underwater electroacoustic transducers*. American National Standards Institute: ANSI, S1.20-1988, New York.
3. *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*. ISO, Genève, Suisse, 1993.
4. MOLLOY, C. T. *Calculation of the directivity index for various types of radiators.* J Acoust Soc Am, 20, 1948, p.387.
5. KENDIG, P. M. and MUESER, R. E. *A simplified method for determining transducer directivity index*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.691.
6. STENZEL, H. *Leitfaden zur Berechung von Schallvorgängen* (zweite Auflage). Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1958.
7. MENGES, K. *Über Richtcharakteristiken von ebenen Strahlerflächen, Strahlerstrecken mit ungleichmässiger Amplitudenverteilung und der Halbkreislinie*. Akustische Zeitschrift, 6, 1941, p.90.
8. ROBINSON, S. P., GREEN, G. J., PRESTON, R. C., *et al*. *International comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 10 kHz to 315 kHz*. Metrologia, 36, 1999, p.287-296.
9. VAN BUREN, A. L., DRAKE, R. M. and PAOLERO, A. E. *Temperature dependence of the sensitivity of hydrophone standards used in international comparisons*. Metrologia, 36, 1999, p.281-295.
10. BEAMISS, G. A. ROBINSON, S. P. HAYMAN, G. and ESWARD, T. J. *Determination of the Variation in Free-Field Hydrophone Response with Temperature and Depth* Acta Acustica United with Acustica, 88, 2002, p.799.
11. IVEY, L. E. and THOMPSON, C. M. *Underwater transducer wetting agents*. J Acoust Soc Am, 78, 1985, p.389-394.
12. ROBINSON, S. P. and DORÉ, G. R. *Uncertainties in the calibration of hydrophones at NPL by the method of three-transducer spherical-wave reciprocity*. NPL Report RSA(EXT) 054, National Physical Laboratory, United Kingdom ,1992.
13. WENZ, G. M. *Acoustic ambient noise in the ocean; spectra and sources*. J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.1936.
14. BALLANTINE, S. *Reciprocity in electromagnetic, mechanical, acoustical and interconnected systems.* Proc Institute of Radio Engineers, 17, 1929, p.929-951.
15. MACLEAN, W. R. *Absolute measurement of sound without a primary standard*. J Acoust Soc Am, 12, 1940, p.140.
16. FOLDY, L. L., and PRIMAKOFF, H. *General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem*, *I*. J Acoust Soc Am, 17, 1945, p.109.
17. PRIMAKOFF, H., and FOLDY, L. L. *General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem*, *II*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.50.
18. MCMILLAN, E. M. *Violation of the reciprocity theorem in linear passive electromechanical systems.* J Acoust Soc Am, 18, 1946, p.345.
19. HECKL, M. Einige *Anwendungen des Reziprozitätsprincips in der Akustik*. Frequenz, 18, 1964, p.299.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Bibliography

1. BOBBER, R. J. *Underwater electroacoustic measurements*. Peninsula Press, Los Altos CA, 1988.
2. *Procedures for calibration of underwater electroacoustic transducers*. American National Standards Institute: ANSI, S1.20-1988, New York.
3. *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, ISO, Geneva, Switzerland, 1993.
4. MOLLOY, C. T. *Calculation of the directivity index for various types of radiators.* J Acoust Soc Am, 20, 1948, p.387.
5. KENDIG, P. M. and MUESER, R. E. *A simplified method for determining transducer directivity index*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.691.
6. STENZEL, H. *Leitfaden zur Berechung von Schallvorgängen* (zweite Auflage). Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1958.
7. MENGES, K. *Über Richtcharakteristiken von ebenen Strahlerflächen, Strahlerstrecken mit ungleichmässiger Amplitudenverteilung und der Halbkreislinie*. Akustische Zeitschrift, 6, 1941, p.90.
8. ROBINSON, S. P., GREEN, G. J., PRESTON, R. C., *et al*. *International comparison of free-field hydrophone calibrations in the frequency range 10 kHz to 315 kHz*. Metrologia, 36, 1999, p.287-296.
9. VAN BUREN, A. L., DRAKE, R. M. and PAOLERO, A. E. *Temperature dependence of the sensitivity of hydrophone standards used in international comparisons*. Metrologia, 36, 1999, p.281-295.
10. BEAMISS, G. A. ROBINSON, S. P. HAYMAN, G. and ESWARD, T. J. *Determination of the Variation in Free-Field Hydrophone Response with Temperature and Depth* Acta Acustica United with Acustica, 88, 2002, p.799.
11. IVEY, L. E. and THOMPSON, C. M. *Underwater transducer wetting agents*. J Acoust Soc Am, 78, 1985, p.389-394.
12. ROBINSON, S. P. and DORÉ, G. R. *Uncertainties in the calibration of hydrophones at NPL by the method of three-transducer spherical-wave reciprocity*. NPL Report RSA(EXT) 054, National Physical Laboratory, United Kingdom ,1992.
13. WENZ, G. M. *Acoustic ambient noise in the ocean; spectra and sources*. J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.1936.
14. BALLANTINE, S. *Reciprocity in electromagnetic, mechanical, acoustical and interconnected systems.* Proc Institute of Radio Engineers, 17, 1929, p.929-951.
15. MACLEAN, W. R. *Absolute measurement of sound without a primary standard*. J Acoust Soc Am, 12, 1940, p.140.
16. FOLDY, L. L., and PRIMAKOFF, H. *General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem*, *I*. J Acoust Soc Am, 17, 1945, p.109.
17. PRIMAKOFF, H., and FOLDY, L. L. *General theory of passive linear electro-acoustic transducers and the electro-acoustic reciprocity theorem*, *II*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.50.
18. MCMILLAN, E. M. *Violation of the reciprocity theorem in linear passive electromechanical systems.* J Acoust Soc Am, 18, 1946, p.345.
19. HECKL, M. Einige *Anwendungen des Reziprozitätsprincips in der Akustik*. Frequenz, 18, 1964, p.299.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

20. RIVIN, A. N., and CHERPAK, V. A. *Pressure calibration of measuring microphones by the reciprocity method*. En russe/in Russian: Akust. Zh., 6, 1960, p.252. [Traduction en anglais/English translation: Soviet Physics-Acoustics, 6, 1960, p.246.]

21. BOBBER, R. J., and SABIN, G. A. *Cylindrical wave reciprocity parameter*. J Acoust Soc Am, 28, 1956, p.705.

22. BOBBER, R. J. *General reciprocity parameter.* J Acoust Soc Am, 39, 1966, p.680.

23. LUKER, L. D. and VAN BUREN, A. L. *Phase calibration of hydrophones*. Journal of the Acoustical Society of America, 70, 519 , 1981.

24. TROTT, W. J. *International standardization in underwater sound measurements*. Acustica, 20, 1968, p.169.

25. KUTTRUFF, J., and WILLE, P. *Absoluteichung verschiedenartiger Wasserschallwandler in Bereich von 5 bis 250 kHz.* Acustica, 12, 1962, p.410.

26. MERMOZ, H. *Etalonnages par réciprocité en champ libre de transducteurs sous-marins.* Acustica, 8, 1958, p.102.

27. BRANDT, O. *Etalonnage d'hydrophones aux fréquences infrasonores*. Acustica, 8, 1958, p.31.

28. CARTENSEN, E. L. *Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.961.

29. SIMMONS, B. D., and URICK, R. J. *Plane wave reciprocity parameter and its application to calibration of electroacoustic transducers at close distances*. J Acoust Soc Am, 21, 1949, p.633.

30. PATTERSON, R. B. *Using the ocean surface as a reflector for self-reciprocity calibration of transducers.* J Acoust Soc Am, 42, 1967, p.653.

31. SABIN, G. A. *Transducer calibration by impedance measurements*. J Acoust Soc Am, 28, 1956, p.705.

32. SABIN, G. A. *New technique for measuring transducer blocked impedance*. J Acoust Soc Am, 30, 1958, p.146.

33. EBAUGH, P., and MUESER, R. E. *The practical application of the reciprocity theorem in the calibration of underwater sound transducers.* J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.695.

34. DIESTEL, H. G. *Kalibrierung von Wasserschallempfängern*. *PTB Mitteilungen*, 6,1965, p.585

35. GOLENKOV, A. N., and PAVLOV, L. E. *A facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free field*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 1, 1969, p.79. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 12, 1969, p.109.]

36. ENYAKOV, A. M., LIKHACHEV, S. M., PLATONOV, V. A., YUAN, W. J., WANG, Y. B. and LI, J. Q. *A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods.* Metrologia, 36, 1999, p.297-303.

37. ROBINSON, S. P. and PRESTON, R. C. *A Survey of European calibration facilities for underwater acoustics: Euromet Project A73*. Proc of the first European Conference on Underwater Acoustics, EUR 14453 EN, Commission of the European Communities, Elseverier Science, 1992, p.45-48.

38. GIANGRECO, C. *Mesures acoustiques apliquées aux antennes sonar*. Lavoisier, France, 1997.

39. GOLENKOV, A. N., GOLUB, S. G., and PAVLOV, L. E. *Operating principles of devices used to calibrate hydrophones and incorporating direct readout of sensitivity*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika 6, 1970, p.886. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 13, 1970, p.886.]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

20. RIVIN, A. N., and CHERPAK, V. A. *Pressure calibration of measuring microphones by the reciprocity method*. En russe/in Russian: Akust. Zh., 6, 1960, p.252. [Traduction en anglais/English translation: Soviet Physics-Acoustics, 6, 1960, p.246.]

21. BOBBER, R. J., and SABIN, G. A. *Cylindrical wave reciprocity parameter*. J Acoust Soc Am, 28, 1956, p.705.

22. BOBBER, R. J. *General reciprocity parameter.* J Acoust Soc Am, 39, 1966, p.680.

23. LUKER, L. D. and VAN BUREN, A. L. *Phase calibration of hydrophones*. Journal of the Acoustical Society of America, 70, 519 , 1981.

24. TROTT, W. J. *International standardization in underwater sound measurements*. Acustica, 20, 1968, p.169.

25. KUTTRUFF, J., and WILLE, P. *Absoluteichung verschiedenartiger Wasserschallwandler in Bereich von 5 bis 250 kHz.* Acustica, 12, 1962, p.410.

26. MERMOZ, H. *Etalonnages par réciprocité en champ libre de transducteurs sous-marins.* Acustica, 8, 1958, p.102.

27. BRANDT, O. *Etalonnage d'hydrophones aux fréquences infrasonores*. Acustica, 8, 1958, p.31.

28. CARTENSEN, E. L. *Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers*. J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.961.

29. SIMMONS, B. D., and URICK, R. J. *Plane wave reciprocity parameter and its application to calibration of electroacoustic transducers at close distances*. J Acoust Soc Am, 21, 1949, p.633.

30. PATTERSON, R. B. *Using the ocean surface as a reflector for self-reciprocity calibration of transducers.* J Acoust Soc Am, 42, 1967, p.653.

31. SABIN, G. A. *Transducer calibration by impedance measurements*. J Acoust Soc Am, 28, 1956, p.705.

32. SABIN, G. A. *New technique for measuring transducer blocked impedance*. J Acoust Soc Am, 30, 1958, p.146.

33. EBAUGH, P., and MUESER, R. E. *The practical application of the reciprocity theorem in the calibration of underwater sound transducers.* J Acoust Soc Am, 19, 1947, p.695.

34. DIESTEL, H. G. *Kalibrierung von Wasserschallempfängern*. *PTB Mitteilungen*, 6,1965, p.585

35. GOLENKOV, A. N., and PAVLOV, L. E. *A facility for the calibration of hydrophones by the reciprocity method in a free field*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 1, 1969, p.79. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 12, 1969, p.109.]

36. ENYAKOV, A. M., LIKHACHEV, S. M., PLATONOV, V. A., YUAN, W. J., WANG, Y. B. and LI, J. Q. *A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods.* Metrologia, 36, 1999, p.297-303.

37. ROBINSON, S. P. and PRESTON, R. C. *A Survey of European calibration facilities for underwater acoustics: Euromet Project A73*. Proc of the first European Conference on Underwater Acoustics, EUR 14453 EN, Commission of the European Communities, Elseverier Science, 1992, p.45-48.

38. GIANGRECO, C. *Mesures acoustiques apliquées aux antennes sonar*. Lavoisier, France, 1997.

39. GOLENKOV, A. N., GOLUB, S. G., and PAVLOV, L. E. *Operating principles of devices used to calibrate hydrophones and incorporating direct readout of sensitivity*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika 6, 1970, p.886. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 13, 1970, p.886.]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

40. GOLENKOV, A. N., GOLUB, S. G., LIKHACHEV, S. M., MAKAREVITCH, V. N. and FADEEV, V. G. *State special standard for the unit of sound pressure in water within a frequency range of 0.001-200 kHz*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 17, 1974, p.2. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 17, 1974, p.985.]

41. SABIN, G. A. *Calibration of piston transducers at marginal test distances*. J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.168.

42. SOROKIN, V. I. *Determination of the sensitivity of cylindrical transducers in marginal-distance calibrations*. Sov. Phys. Acoust, 19, 1973, p.274.

43. YANPOL'SKII, A. A. *Absolute calibration of electroacoustical transducers by a reciprocity technique in a quasispherical field*. En russe/in Russian: Trudy komissil po akustike, 8, 1955, p.2.

44. SIMS, C. C., and HENRIQUEZ, T. A. *Reciprocity calibration of a standard hydrophone at 16,000 psi.* J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.1704.

45. URICK, R. J. *Principles of underwater sound for engineers*. McGraw-Hill Book Company, New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney, 1967.

46. SCHULKIN, M., and MARSH, H. W. Absorption of sound in seawater. J. Brit. IRE, 25, 1963, p.493, and J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.864.

47. TROTT, W. J. *Underwater-sound transducer calibration from near-field data*. J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.1557.

48. GOLENKOV, A. N. *On the hydrophone acoustic centre determination in quasistatic conditions* (in Russian). Proceedings of VNIIFTRI, 23, Moscow, 1975, p.53.

49. WENTE, E. C. *A condenser transmitter as a uniformly sensitive instrument for the absolute measurement of sound intensity*. Phys. Rev., 10, 1917, p39.

50. KAYE, G. W. C. *Acoustical work of the National Physical Laboratory*. J Acoust Soc Am, 7, 1936, p.167.

51. GLOVER, R. and BAUMZWEIGER, B. A. *A moving-coil microphone for measurement of sound field pressure*. J Acoust Soc Am, 10, 1939, p.200.

52. GOLENKOV, A. N. *Absolute calibration of infrasonic pressure detectors in an air and water resonator with hydrostatic excitation*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 5, 1965, p.41. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 8, 1965, p.444.]

53. BURENKOV, Y., PLATONOV, F., and PLATONOV, V. *Estimation of dynamic effects in low-frequency hydrophone calibration*. Proc 2nd EAA International Symposium on Hydroacoustics, 27-27 May 1999, Gdansk-Jurata, Poland.

54. NEKRASOV, V. N. and NEKRICH, S. F. *An application of hydrostatic method for the calibration of hydrophones at high static pressure.* En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 10, 1989, p.51. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 10, 1989, p.1023.]

55. GOLENKOV, A. N., and LIKHACHEV, S. M. *Features of the calibration of hydrophones in the nonuniform field of measuring chambers*. En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 11, 1994, p.57. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 37, 1994, p.1301.]

56. TROTT, W. J., and LIDE, E. N. *Two-projector null method for calibration of hydrophones at low audio and infrasonic frequencies*. J Acoust Soc Am, 27, 1955, p.951.

57. GOLENKOV, A. N. *Calibration of measuring hydrophones in the frequency range 0.1 to 100 Hz*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 9, 1961, p.53. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 4, 1961, p.752.]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

40. GOLENKOV, A. N., GOLUB, S. G., LIKHACHEV, S. M., MAKAREVITCH, V. N. and FADEEV, V. G. *State special standard for the unit of sound pressure in water within a frequency range of 0.001-200 kHz*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 17, 1974, p.2. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 17, 1974, p.985.]

41. SABIN, G. A. *Calibration of piston transducers at marginal test distances*. J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.168.

42. SOROKIN, V. I. *Determination of the sensitivity of cylindrical transducers in marginal-distance calibrations*. Sov. Phys. Acoust, 19, 1973, p.274.

43. YANPOL'SKII, A. A. *Absolute calibration of electroacoustical transducers by a reciprocity technique in a quasispherical field*. En russe/in Russian: Trudy komissil po akustike, 8, 1955, p.2.

44. SIMS, C. C., and HENRIQUEZ, T. A. *Reciprocity calibration of a standard hydrophone at 16,000 psi.* J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.1704.

45. URICK, R. J. *Principles of underwater sound for engineers*. McGraw-Hill Book Company, New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney, 1967.

46. SCHULKIN, M., and MARSH, H. W. Absorption of sound in seawater. J. Brit. IRE, 25, 1963, p.493, and J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.864.

47. TROTT, W. J. *Underwater-sound transducer calibration from near-field data*. J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.1557.

48. GOLENKOV, A. N. *On the hydrophone acoustic centre determination in quasistatic conditions* (in Russian). Proceedings of VNIIFTRI, 23, Moscow, 1975, p.53.

49. WENTE, E. C. *A condenser transmitter as a uniformly sensitive instrument for the absolute measurement of sound intensity*. Phys. Rev., 10, 1917, p39.

50. KAYE, G. W. C. *Acoustical work of the National Physical Laboratory*. J Acoust Soc Am, 7, 1936, p.167.

51. GLOVER, R. and BAUMZWEIGER, B. A. *A moving-coil microphone for measurement of sound field pressure*. J Acoust Soc Am, 10, 1939, p.200.

52. GOLENKOV, A. N. *Absolute calibration of infrasonic pressure detectors in an air and water resonator with hydrostatic excitation*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 5, 1965, p.41. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 8, 1965, p.444.]

53. BURENKOV, Y., PLATONOV, F., and PLATONOV, V. *Estimation of dynamic effects in low-frequency hydrophone calibration*. Proc 2nd EAA International Symposium on Hydroacoustics, 27-27 May 1999, Gdansk-Jurata, Poland.

54. NEKRASOV, V. N. and NEKRICH, S. F. *An application of hydrostatic method for the calibration of hydrophones at high static pressure.* En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 10, 1989, p.51. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 10, 1989, p.1023.]

55. GOLENKOV, A. N., and LIKHACHEV, S. M. *Features of the calibration of hydrophones in the nonuniform field of measuring chambers*. En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 11, 1994, p.57. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 37, 1994, p.1301.]

56. TROTT, W. J., and LIDE, E. N. *Two-projector null method for calibration of hydrophones at low audio and infrasonic frequencies*. J Acoust Soc Am, 27, 1955, p.951.

57. GOLENKOV, A. N. *Calibration of measuring hydrophones in the frequency range 0.1 to 100 Hz*. En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 9, 1961, p.53. [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 4, 1961, p.752.]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

58. GOLENKOV, A. N., and PAVLOV, L. E. *Absolute calibration of measuring hydrophones in the audio-frequency range.* En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 5, 44 (1967). [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 10, 579 (1967)].

59. MCMAHON, G. A. *Coupler-reciprocity system for hydrophone calibration at high pressures.* J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.2311.

60. ZALESAK, J. F. *Transfer coupler reciprocity: A new low-frequency coupler-reciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions.* J Acoust Soc Am, 105, 1999, p.2342.

61. ZALESAK, J. F. *Considerations for a new high-accuracy transfer-coupler reciprocity system for absolute electro-acoustic calibration*. Metrologia, 36, 1999, p.305.

62. MCKINNEY, J. E., EDELMAN, S., and MARVIN, R. S. *Apparatus for the direct determination of the dynamic bulk modulus*. Journal of Applied Physics, 27, 1956, p.425.

63. NEKRASOV, V. N. and NEKRICH, S. F. *Modified reciprocity method for the calibration in small-volume chambers*. En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 1, 1988, p.43. [English translation: Measurement Techniques, 31, 1988, p.77.]

64. LIPSCOMB, L. W. I. *An instrument semi-automatic acoustic calibration system and attachments thereto*. Proc Institute of Acoustics, 6, 1985, p.113.

65. BERANEK, L. *Acoustic measurements*, John Wiley, 1949.

66. BARHAM, R. G. *The National Physical Laboratory laser pistonphone*. Journal of Low Frequency Sound and Vibration, 12, 1993, p.36.

67. MERHAUT, J. and VLCEK, M. *Pistonphone with differential piston*. J Acoust Soc Am, 30, 1958, p.263.

68. SCHLOSS, F., and STRASBERG, M. *Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid*. J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.958.

69. ROBINSON, S. P. *Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks*. NPL Report CMAM 034, June 1999.

70. DAVIE, O. H. *The elements of pulse techniques*. Renhold Publishing Corp., New York, 1964.

71. CHERRY, C. *Pulses and transients in communication circuits*. Dover Publications, Inc., New York, 1950.

72. CEI 60263:1982, *Echelles et dimensions des graphiques pour le tracé des courbes de réponse en fréquence et des diagrammes polaires*

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

58. GOLENKOV, A. N., and PAVLOV, L. E. *Absolute calibration of measuring hydrophones in the audio-frequency range.* En russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 5, 44 (1967). [Traduction en anglais/English translation: Measurement Techniques, 10, 579 (1967)].

59. MCMAHON, G. A. *Coupler-reciprocity system for hydrophone calibration at high pressures.* J Acoust Soc Am, 36, 1964, p.2311.

60. ZALESAK, J. F. *Transfer coupler reciprocity: A new low-frequency coupler-reciprocity technique for the absolute calibration of field hydrophones under full environmental conditions.* J Acoust Soc Am, 105, 1999, p.2342.

61. ZALESAK, J. F. *Considerations for a new high-accuracy transfer-coupler reciprocity system for absolute electro-acoustic calibration*. Metrologia, 36, 1999, p.305.

62. MCKINNEY, J. E., EDELMAN, S., and MARVIN, R. S. *Apparatus for the direct determination of the dynamic bulk modulus*. Journal of Applied Physics, 27, 1956, p.425.

63. NEKRASOV, V. N. and NEKRICH, S. F. *Modified reciprocity method for the calibration in small-volume chambers*. En Russe/in Russian: Izmeritel'naya Tekhnika, 1, 1988, p.43. [English translation: Measurement Techniques, 31, 1988, p.77.]

64. LIPSCOMB, L. W. I. *An instrument semi-automatic acoustic calibration system and attachments thereto*. Proc Institute of Acoustics, 6, 1985, p.113.

65. BERANEK, L. *Acoustic measurements*, John Wiley, 1949.

66. BARHAM, R. G. *The National Physical Laboratory laser pistonphone*. Journal of Low Frequency Sound and Vibration, 12, 1993, p.36.

67. MERHAUT, J. and VLCEK, M. *Pistonphone with differential piston*. J Acoust Soc Am, 30, 1958, p.263.

68. SCHLOSS, F., and STRASBERG, M. *Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid*. J Acoust Soc Am, 34, 1962, p.958.

69. ROBINSON, S. P. *Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks*. NPL Report CMAM 034, June 1999.

70. DAVIE, O. H. *The elements of pulse techniques*. Renhold Publishing Corp., New York, 1964.

71. CHERRY, C. *Pulses and transients in communication circuits*. Dover Publications, Inc., New York, 1950.

72. IEC 60263:1982, *Specification for scales and sizes for plotting frequency characteristics and polar diagrams*

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC**/CSC at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards-making process.

Nicht frankieren
Ne pas affranchir

Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: *(e.g. 60601-1-1)*

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard *(tick all that apply).* I am the/a:

purchasing agent ❑
librarian ❑
researcher ❑
design engineer ❑
safety engineer ❑
testing engineer ❑
marketing specialist ❑
other.....

Q3 I work for/in/as a: *(tick all that apply)*

manufacturing ❑
consultant ❑
government ❑
test/certification facility ❑
public utility ❑
education ❑
military ❑
other.....

Q4 This standard will be used for: *(tick all that apply)*

general reference ❑
product research ❑
product design/development ❑
specifications ❑
tenders ❑
quality assessment ❑
certification ❑
technical documentation ❑
thesis ❑
manufacturing ❑
other.....

Q5 This standard meets my needs: *(tick one)*

not at all ❑
nearly ❑
fairly well ❑
exactly ❑

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: *(tick all that apply)*

standard is out of date ❑
standard is incomplete ❑
standard is too academic ❑
standard is too superficial ❑
title is misleading ❑
I made the wrong choice ❑
other .....

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:
(1) unacceptable,
(2) below average,
(3) average,
(4) above average,
(5) exceptional,
(6) not applicable

timeliness.....
quality of writing.....
technical contents.....
logic of arrangement of contents .....
tables, charts, graphs, figures.....
other .....

Q8 I read/use the: *(tick one)*

French text only ❑
English text only ❑
both English and French texts ❑

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Suisse

ou

Télécopie: **CEI**/CSC +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

Nicht frankieren
Ne pas affranchir

Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 GENÈVE 20
Suisse

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact: (*ex. 60601-1-1)*

.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction?
(cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

agent d'un service d'achat ❑
bibliothécaire ❑
chercheur ❑
ingénieur concepteur ❑
ingénieur sécurité ❑
ingénieur d'essais ❑
spécialiste en marketing ❑
autre(s).....

Q3 Je travaille:
(cochez tout ce qui convient)

dans l'industrie ❑
comme consultant ❑
pour un gouvernement ❑
pour un organisme d'essais/ certification ❑
dans un service public ❑
dans l'enseignement ❑
comme militaire ❑
autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme
(cochez tout ce qui convient)

ouvrage de référence ❑
une recherche de produit ❑
une étude/développement de produit ❑
des spécifications ❑
des soumissions ❑
une évaluation de la qualité ❑
une certification ❑
une documentation technique ❑
une thèse ❑
la fabrication ❑
autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins:
(une seule réponse)

pas du tout ❑
à peu près ❑
assez bien ❑
parfaitement ❑

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes:
(cochez tout ce qui convient)

la norme a besoin d'être révisée ❑
la norme est incomplète ❑
la norme est trop théorique ❑
la norme est trop superficielle ❑
le titre est équivoque ❑
je n'ai pas fait le bon choix ❑
autre(s) .....

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres
(1) inacceptable,
(2) au-dessous de la moyenne,
(3) moyen,
(4) au-dessus de la moyenne,
(5) exceptionnel,
(6) sans objet

publication en temps opportun .....
qualité de la rédaction.....
contenu technique .....
disposition logique du contenu .....
tableaux, diagrammes, graphiques, figures.....
autre(s) .....

Q8 Je lis/utilise: *(une seule réponse)*

uniquement le texte français ❑
uniquement le texte anglais ❑
les textes anglais et français ❑

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

ISBN 2-8318-8886-7



ICS 17.140.50

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale