

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60565A

Première édition
First edition
1980-01

Premier complément à la Publication 60565 (1977)

Etalonnage des hydrophones

First supplement to Publication 60565 (1977)

Calibration of hydrophones



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60565A: 1980

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60565A

Première édition
First edition
1980-01

Premier complément à la Publication 60565 (1977)

Etalonnage des hydrophones

First supplement to Publication 60565 (1977)

Calibration of hydrophones

© IEC 1980 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
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

M

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
10. Etalonnage au pistonphone	6
10.1 Domaine d'application	6
10.2 Objet	6
10.3 Introduction	6
10.4 Limitations	6
10.5 Pression acoustique	8
10.6 Corrections	10
10.7 Etalonnage absolu	10
10.8 Etalonnage par comparaison	12
11. Etalonnage à la colonne vibrante	12
11.1 Domaine d'application	12
11.2 Objet	12
11.3 Introduction	14
11.4 Expression de la sensibilité	14
11.5 Détermination de la sensibilité	16
11.6 Conditions de mesure	18
11.7 Précision	20
ANNEXE E — Circuit équivalent du dispositif d'excitation	22
BIBLIOGRAPHIE	24

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
10. Calibration with a pistonphone	7
10.1 Scope	7
10.2 Object	7
10.3 Introduction	7
10.4 Restrictions	7
10.5 Sound pressure	9
10.6 Corrections	11
10.7 Absolute calibration	11
10.8 Calibration by comparison	13
11. Calibration with a vibrating column	13
11.1 Scope	13
11.2 Object	13
11.3 Introduction	15
11.4 Expression of the sensitivity	15
11.5 Determination of the sensitivity	17
11.6 Conditions of measurement	19
11.7 Accuracy	21
APPENDIX E — Equivalent circuit of the excitation system	23
BIBLIOGRAPHY	24

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

Premier complément à la Publication 565 (1977)

ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 29D: Ultrasons, du Comité d'Etudes N° 29 de la CEI: Electroacoustique.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Oslo en 1972, à Moscou en 1974, à Washington en 1976 et à Budapest en 1977. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 29D(Bureau Central)12, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juin 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')
Allemagne
Australie
Autriche
Belgique
Bulgarie
Canada
Chine
Danemark
Egypte
Espagne

Etats-Unis d'Amérique
France
Norvège
Pays-Bas
Pologne
Royaume-Uni
Suède
Tchécoslovaquie
Turquie
Union des Républiques
Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

First supplement to Publication 565 (1977)

CALIBRATION OF HYDROPHONES

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-committee 29D: Ultrasonics, of IEC Technical Committee No. 29: Electro-acoustics.

Drafts were discussed at meetings held in Oslo in 1972, in Moscow in 1974, in Washington 1976 and in Budapest 1977. As a result of this latter meeting, a draft, Document 29D(Central Office)12, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia
Austria
Belgium
Bulgaria
Canada
China
Czechoslovakia
Denmark
Egypt
France
Germany

Netherlands
Norway
Poland
South Africa (Republic of)
Spain
Sweden
Turkey
Union of Soviet
Socialist Republics
United Kingdom
United States of America

Premier complément à la Publication 565 (1977)

ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES

Page 62

10. Etalonnage avec un pistonphone, entre 1 Hz et 50 Hz

Modifier le titre et remplacer « A l'étude » par le texte suivant :

10. Etalonnage au pistonphone

10.1 *Domaine d'application*

Cette méthode permet d'étalonner un hydrophone de façon simple dans une chambre partiellement remplie d'eau, à des fréquences basses où la longueur d'onde est grande par rapport aux plus grandes dimensions de la chambre.

La précision est moins bonne que celle de la méthode par compensation dans une chambre fermée, décrite à l'article 9, et la gamme de fréquences est plus réduite.

10.2 *Objet*

Spécifier une méthode simple pour étalonner un hydrophone dans une chambre de petites dimensions sans utiliser un transducteur étalon.

10.3 *Introduction*

Le pistonphone fournit une méthode simple et pratique pour déterminer la sensibilité des hydrophones à la pression aux fréquences basses. Dans la bande de fréquences de 1 Hz à 50 Hz, l'erreur de mesure ne dépasse pas ± 1 dB.

Dans son principe, la méthode est une méthode absolue, mais elle peut être également utilisée par comparaison avec un hydrophone étalon.

Le pistonphone est constitué d'une chambre partiellement remplie d'eau. Un piston oscillant à la partie supérieure de la chambre crée une pression acoustique à l'intérieur de celle-ci. Le piston peut être excité à l'aide d'un moteur électrique ou d'une bobine mobile. Son mouvement doit engendrer une variation de volume purement sinusoïdale. Un ou plusieurs hydrophones sont entièrement immergés dans la partie inférieure de la chambre. Voir figure 12, page 8.

10.4 *Limitations*

Pour s'assurer que la pression acoustique est identique en chaque point de la chambre, ses dimensions doivent être petites par rapport à la longueur d'onde du son. Les plus grandes dimensions du volume d'air et du volume d'eau doivent être respectivement inférieures au seizième de la longueur d'onde du son dans l'air et dans l'eau. Puisque la vitesse du son dans l'eau est environ cinq fois supérieure à la vitesse du son dans l'air, la plus grande dimension du volume d'air doit être environ égale au cinquième de la plus grande dimension du volume d'eau.

First supplement to Publication 565 (1977)

CALIBRATION OF HYDROPHONES

Page 63

10. Calibration with a pistonphone, between 1 Hz and 50 Hz

Amend title and replace "Under consideration" by the following text:

10. Calibration with a pistonphone

10.1 Scope

This method allows a hydrophone to be calibrated in a simple way inside a chamber partly filled with water, at low frequencies at which the wavelength is large compared with the largest dimensions of the chamber.

The accuracy is less than for the method of compensation in a closed chamber, described in Clause 9, and the frequency range is smaller.

10.2 Object

To specify a simple method for calibration of a hydrophone in a small chamber, without a standard transducer.

10.3 Introduction

The pistonphone provides a simple and convenient method of determining the pressure sensitivity of hydrophones at low frequencies. In the frequency range of 1 Hz to 50 Hz an accuracy can be obtained with an error of less than ± 1 dB.

The method is in principle an absolute method, but can be used also in comparison with a standard hydrophone.

The pistonphone consists of a chamber partly filled with water. An oscillating piston in the top of the chamber generates an acoustic pressure inside the chamber. This piston may be driven by an electric motor or by a moving coil. Its motion should produce a pure sinusoidal volume change. One or more hydrophones are completely submerged in the lower part of the chamber. See Figure 12, page 9.

10.4 Restrictions

In order to ensure that the sound pressure is equal at all points inside the chamber, its dimensions must be small in relation to the wavelength of the sound. The largest dimensions of the air volume and of the water volume should be smaller than one-sixteenth of the wavelength of the sound in air, and in water respectively. Since the sound velocity in water is about five times the sound velocity in air, the largest dimension of the air volume should be about one-fifth of the largest dimension of the water volume.

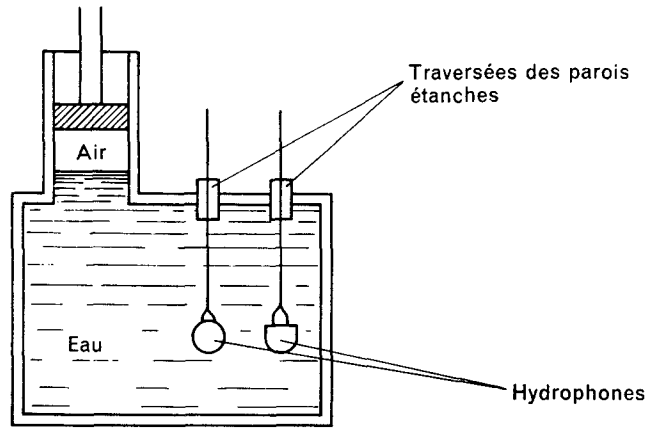


FIG. 12. — Pistonphone.

La chambre doit être suffisamment grande pour contenir le ou les hydrophones. La plus grande dimension de la chambre détermine la limite supérieure de la gamme de fréquences d'utilisation du pistonphone. La limite supérieure de fréquence peut dépendre non seulement des dimensions de la chambre, mais aussi de l'apparition de vibrations non uniformes du piston à des fréquences plus élevées.

L'impédance acoustique dans un pistonphone peut être considérée comme une complaisance pure, due essentiellement à la complaisance du volume d'air. La complaisance propre de la chambre y compris l'eau et le ou les hydrophones doit être négligeable. En particulier, la complaisance de l'hydrophone ne peut être supérieure à la complaisance d'un égal volume d'eau. Les hydrophones construits avec un matériau de décompression ne peuvent pas être étalonnés dans un pistonphone.

Voir les notes 2 et 3 du paragraphe 9.4.

Note. — Certains hydrophones sont sensibles non seulement à la pression acoustique, mais également au gradient de pression et à la vitesse des particules du fluide. L'existence d'un champ de pression strictement homogène à l'intérieur de la chambre fait que les hydrophones qui répondent aussi à ces modes d'excitations ne peuvent pas être étalonnés dans un pistonphone sans le risque de résultats erronés.

10.5 Pression acoustique

En supposant que les variations sinusoïdales de pression dans la chambre soient adiabatiques, la pression acoustique peut être calculée à partir de la loi de compression adiabatique des gaz:

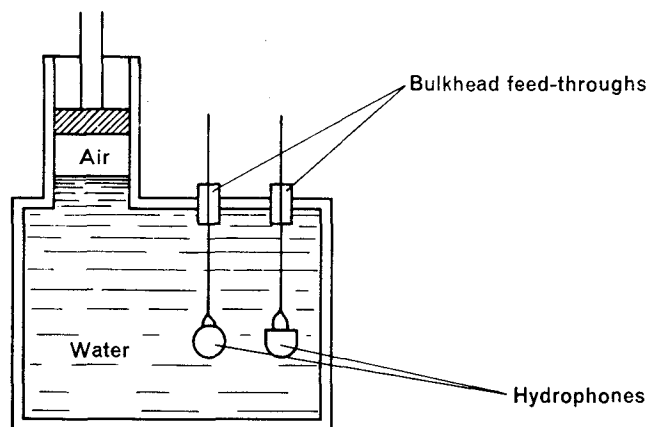
$$p V^\gamma = \text{constante} \quad (10.1)$$

où γ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air.

Par suite, si l'amplitude crête de la variation de volume $\hat{V}$ est petite par rapport au volume d'air statique V_0 , l'amplitude crête de la pression acoustique $\hat{p}$ est donnée par:

$$\hat{p} = \gamma \frac{\hat{V}}{V_0} p_0 \quad (10.2)$$

où p_0 est égal à la pression statique de l'air.



050/80

FIG. 12. — Pistonphone.

The chamber should be large enough to enclose the hydrophone(s). The largest chamber dimension sets the upper limit of the useful frequency range of the pistonphone. The upper frequency limit may depend not only on the dimensions of the chamber, but also on the occurrence of non-uniform vibrations of the piston at higher frequencies.

The acoustic impedance in a pistonphone may be regarded as a pure compliance, being mainly the compliance of the air volume. The compliance of the chamber itself with the water and the hydrophone(s) must be negligibly small. In particular, the compliance of the hydrophone may not be larger than the compliance of an equal volume of water. Hydrophones with incorporated pressure release material cannot be calibrated in a pistonphone.

See Notes 2 and 3 to Sub-clause 9.4.

Note. — Some hydrophones are sensitive not only to sound pressure, but also to sound pressure gradient and to particle velocity. As a result of the purely homogeneous pressure field inside the chamber, hydrophones that also respond to these kinds of excitations cannot be calibrated inside a pistonphone without the risk of erroneous results.

10.5 Sound pressure

Assuming that the sinusoidal pressure variations inside the chamber occur adiabatically, the sound pressure can be calculated from the adiabatic gas law:

$$p V^\gamma = \text{constant} \quad (10.1)$$

where γ is the ratio of the specific heat of air.

Then, if the peak amplitude of the volume displacement $\hat{V}$ is small compared with the equilibrium air volume V_0 , the peak amplitude of the acoustic pressure $\hat{p}$ is given by:

$$\hat{p} = \gamma \frac{\hat{V}}{V_0} p_0 \quad (10.2)$$

where p_0 is equal to the equilibrium air pressure.

10.6 Corrections

Les corrections à appliquer à la pression acoustique, dans l'équation, sont liées aux conditions non idéales concernant les complaisances, l'échange thermique, les fuites du piston et les ondes stationnaires. Moyennant certaines précautions dans la réalisation du pistonphone et dans l'expérimentation, on peut se dispenser des corrections.

La complaisance de la chambre doit être négligeable par rapport à la complaisance du volume d'air, même dans le cas d'une construction de la chambre relativement rigide. Des précautions particulières doivent être prises pour la réalisation du passage du câble de l'hydrophone à travers la paroi de la chambre.

S'il est du type presse-étoupe, sa compressibilité, liée au caractère généralement flexible du câble, peut être une source d'erreurs imprévue. Des traversées fixes, assurées par des prises se terminant à l'intérieur de la chambre par un connecteur étanche incompressible, sont recommandées.

L'écart par rapport à la compression purement adiabatique est dû à la condition thermique entre l'air et les parois de la chambre. L'effet est généralement faible, mais il croît en sens inverse de la fréquence. Au-dessus de 5 Hz, aucune correction n'est nécessaire.

Les fuites d'air se produisant autour du piston dépendent du jeu entre le piston et l'alésage. Si ce jeu est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre, aucune correction n'est nécessaire au-dessus de 5 Hz.

Si la longueur d'onde du son dans l'air est 16 fois supérieure à la plus grande dimension du volume d'air, et si la longueur d'onde dans l'eau est 16 fois supérieure à la plus grande dimension du volume d'eau, aucune correction n'est nécessaire en ce qui concerne les ondes stationnaires dans la chambre.

10.7 Etalonnage absolu

L'étalonnage doit être effectué dans les conditions définies aux articles 5 et 6.

L'amplitude crête $\hat{V}$ de la variation de volume du piston doit être déterminée à partir de la mesure du diamètre du piston et de sa course totale, avec une erreur inférieure à $\pm 1\%$.

Le volume d'air statique V_0 doit être déterminé à partir des dimensions de la chambre et du niveau de l'eau, avec une erreur inférieure à $\pm 1\%$.

La pression d'air statique p_0 doit être mesurée au moyen d'un capteur de pression étalonné avec précision avec une erreur inférieure à $\pm 1\%$.

Finalement, l'amplitude crête $\hat{p}$ de la pression acoustique est déterminée par l'équation 10.2.

La fréquence du signal aux bornes de l'hydrophone doit être mesurée avec une erreur inférieure à $\pm 5\%$.

La valeur crête de la tension en circuit ouvert aux bornes de l'hydrophone doit être mesurée selon les règles du paragraphe 6.3.

La sensibilité à la pression de l'hydrophone est égale au rapport de la tension crête en circuit ouvert à la pression acoustique crête, à la fréquence de mesure.

L'erreur sur le résultat doit être inférieure à $\pm 10\%$, soit ± 1 dB.

10.6 Corrections

Corrections to the equation for the sound pressure are connected with non-ideal conditions of compliances, heat exchange, piston leakage and standing waves. If certain precautions are taken with respect to the design and operation of the pistonphones, corrections may be avoided.

Even with a moderately rigid construction of the chamber, its compliance will be insignificant in comparison with the compliance of the air volume. Special attention is required for the construction by which the cable of the hydrophone is brought through the wall of the chamber.

If a compression type gasket is used, the compressibility of this gasket with the generally flexible cable may cause unexpected errors. Fixed bulkhead feed-through bushings are recommended, terminated inside the chamber with an incompressible watertight connector.

Departure from purely adiabatic compression is caused by the thermal conduction between the air and the chamber walls. The effect is small in general, but it increases with decreasing frequency. At frequencies higher than 5 Hz no correction will be necessary.

Air leakage around the piston depends on the radial clearance between the piston and the bore. If this clearance is of the order of a few hundredths of a millimetre, no corrections are necessary at frequencies higher than 5 Hz.

If the wavelength of the sound in air is larger than 16 times the largest dimension of the air volume, and if the wavelength in water is larger than 16 times the largest size of the water volume, no corrections are needed for standing waves in the chamber.

10.7 Absolute calibration

The calibration shall be performed under the conditions laid down in Clauses 5 and 6.

The peak amplitude $\hat{V}$ of the volume displacement of the piston shall be determined by measuring the diameter of the piston and the total excursion, with an error of less than $\pm 1\%$.

The equilibrium air volume V_0 shall be determined from the dimensions of the chamber and the level of the water, with an error of less than $\pm 1\%$.

The equilibrium air pressure p_0 shall be measured by means of a calibrated precision pressure gauge with an error of less than $\pm 1\%$.

Then the peak amplitude $\hat{p}$ of the acoustic pressure is determined by equation 10.2.

The frequency of the signal at the hydrophone terminals shall be measured with an error of less than $\pm 5\%$.

The peak value of the open circuit voltage at the terminals of the hydrophone shall be measured in accordance with Sub-clause 6.3.

The pressure sensitivity of the hydrophone is equal to the ratio of the open circuit peak voltage to the peak sound pressure, at the measured frequency.

The error in the result will be less than $\pm 10\%$ or ± 1 dB.

10.8 *Etalonnage par comparaison*

10.8.1 *Comparaison simultanée*

L'hydrophone inconnu et un hydrophone étalon calibré sont placés tous les deux dans le volume d'eau de la chambre.

Le pistonphone étant mis en fonctionnement, la sensibilité de l'hydrophone inconnu peut être déterminée à partir de la mesure du rapport des tensions de sortie des deux hydrophones. Il n'est pas nécessaire de mesurer le volume, la variation de volume ou la pression.

La précision dépend de l'exactitude de la mesure de la tension électrique et de la précision de l'étalonnage de l'hydrophone étalon.

Une erreur inférieure à ± 2 dB est généralement admise.

10.8.2 *Comparaison décalée*

Première étape

Un hydrophone étalon calibré étant placé dans la chambre, on mesure sa tension de sortie pendant le fonctionnement du pistonphone.

Deuxième étape

On remplace l'hydrophone étalon par l'hydrophone inconnu.

On mesure la tension de sortie de l'hydrophone en maintenant les mêmes conditions quant au volume d'air, à l'amplitude du piston, à la pression statique et à la température.

Le rapport des tensions de sortie correspondant à chacun des hydrophones permet d'en déduire la sensibilité de l'hydrophone inconnu.

Par suite d'erreurs possibles sur le niveau de l'eau, sur la pression statique de l'air et sur l'amplitude du piston, la précision de cette méthode est inférieure à celle que l'on obtient par comparaison simultanée, méthode décrite au paragraphe 10.8.1.

11. **Etalonnage avec une colonne vibrante, entre 10 Hz et 3 kHz**

Modifier le titre et remplacer « A l'étude » par le texte suivant :

11. **Etalonnage à la colonne vibrante**

11.1 *Domaine d'application*

Cette méthode permet d'étalonner un hydrophone de façon simple, dans une colonne de liquide en communication avec l'extérieur, aux basses fréquences dans une gamme où la longueur d'onde est supérieure à la longueur de la colonne.

La précision est inférieure à celle de la méthode par compensation dans une chambre fermée, décrite à l'article 9, mais la bande de fréquences est plus large.

11.2 *Objet*

Spécifier une méthode simple pour étalonner un hydrophone dans une chambre non close, sans transducteur étalon.

10.8 Calibration by comparison

10.8.1 Simultaneous comparison

The unknown hydrophone and a calibrated standard hydrophone are placed together inside the water volume in the chamber.

By measurement of the ratio of the output voltages of both hydrophones when the pistonphone is operating, the sensitivity of the unknown hydrophone can be determined. Measurement of volume, volume displacement or pressure is not required.

The precision depends on the accuracy of the electrical voltage measurement and on the precision of the calibration of the standard hydrophone.

Generally an error of less than ± 2 dB may be expected.

10.8.2 Separated comparison

First step

A calibrated standard hydrophone is placed inside the chamber and its output voltage is measured while the pistonphone is operating.

Second step

The standard hydrophone is replaced by the unknown hydrophone.

The output voltage of the hydrophone is measured under the same conditions of air volume, piston amplitude, equilibrium pressure and temperature.

From the ratio of the output voltages of both hydrophones the sensitivity of the unknown hydrophone can be determined.

Because of possible errors in the water level, the equilibrium air pressure and the amplitude of the piston, this method is less accurate than that of simultaneous comparison, described in Sub-clause 10.8.1.

11. Calibration with a vibrating column, between 10 Hz and 3 kHz

Amend title and replace "Under consideration" by the following text:

11. Calibration with a vibrating column

11.1 Scope

This method, using an open column of liquid at low frequencies at which the wavelength is larger than the length of the column, allows a hydrophone to be calibrated in a simple way.

The accuracy is less than for the method of compensation in a closed chamber, described in Clause 9, but the frequency range is larger.

11.2 Object

To specify a simple method for calibration of a hydrophone in an open chamber, without a standard transducer.

11.3 Introduction

La méthode consiste à immerger un hydrophone dans une colonne de liquide qui est soumise extérieurement à une excitation sinusoïdale; l'hydrophone est maintenu immobile et suspendu verticalement près de l'axe central de la colonne.

Un récipient cylindrique aux parois rigides contient généralement la colonne du liquide. Dans ce récipient, ouvert à la partie supérieure, l'excitation de la colonne de liquide peut s'effectuer soit par un transducteur électrodynamique fixé à la partie inférieure, soit par un générateur de vibrations, excitant l'ensemble du récipient, comme le montre la figure 13.

La sensibilité de l'hydrophone est 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.

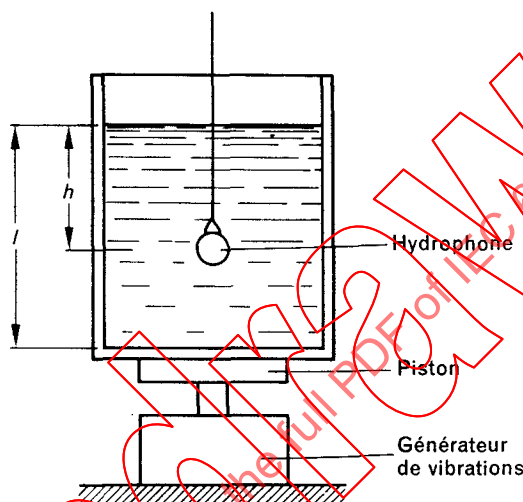


FIG. 13. — Colonne vibrante.

Par suite, c'est une méthode d'étalonnage absolue, bien qu'elle se prête également à étalonnage par comparaison décalée. Voir paragraphe 10.8.2.

La limite supérieure de la gamme de fréquences d'utilisation dépend de la dimension du récipient qui ne doit pas dépasser un quart de la longueur d'onde du son dans le liquide. Voir paragraphe 11.6.1. La gamme de fréquences est généralement comprise entre 10 Hz et 3 000 Hz.

11.4 Expression de la sensibilité

En supposant que tous les points du liquide se déplacent également par rapport à leur position d'équilibre, l'amplitude crête $\hat{p}$ de la pression sinusoïdale en un point du liquide situé à une profondeur h est donnée par:

$$\hat{p} = \rho \hat{x} |g - h \omega^2| \quad (11.1)$$

où

ρ est la densité du liquide

$\hat{x}$ est l'amplitude vibratoire crête à la base du récipient

g est l'accélération due à la pesanteur

ω est la pulsation de vibration

11.3 Introduction

The method consists of immersing 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.

Generally the column of liquid is contained in a cylindrical vessel with rigid walls. Within this vessel, open at the top, the liquid column is driven at the bottom by an electrodynamic transducer, or the whole vessel is driven by a vibration generator, as shown in Figure 13.

The sensitivity of the hydrophone is obtained from the calculated pressure at the depth of the hydrophone and the measured open circuit voltage.

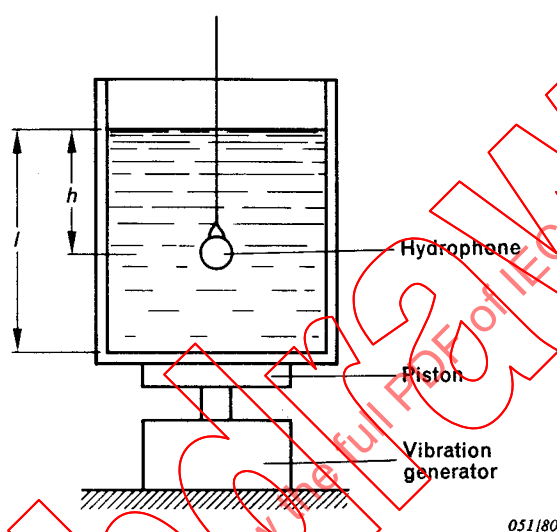


FIG. 13. — Vibrating column.

Hence, this method is an absolute calibration, although it lends itself to calibration by separate comparison as well. See Sub-clause 10.8.2.

The upper limit of the useful frequency range depends on the size of the vessel, which should be smaller than a quarter of the wavelength of the sound in the liquid. See Sub-clause 11.6.1. Generally a frequency range from 10 Hz to 3 000 Hz can be used.

11.4 Expression of the sensitivity

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 h below the surface is given by:

$$\hat{p} = \rho \hat{x} |g - h \omega^2| \quad (11.1)$$

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

ω is the angular frequency of the vibration

Dans cette équation, on ne tient pas compte des fluctuations de pression dues au mouvement 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 comparée à la dimension de l'hydrophone. (Voir la bibliographie, page 24, référence [67].)

Aux très basses fréquences pour lesquelles $h \omega^2$ est petit par rapport à g , l'équation (11.1) se réduit à :

$$\hat{p} = \rho g \hat{x} \quad (11.2)$$

qui est indépendante de la fréquence.

Aux fréquences plus élevées, où $h \omega^2$ devient grand par rapport à g , la pression est proportionnelle au carré de la fréquence :

$$\hat{p} = \rho \hat{x} h \omega^2 \quad (11.3)$$

Le changement entre ces deux expressions se produit pour une fréquence correspondant à :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{h}}$$

soit, par exemple, 1,6 Hz pour $h = 10$ cm.

Par conséquent, l'équation (11.3) est pratiquement valable aux fréquences supérieures à 10 Hz.

11.5 Détermination de la sensibilité

La sensibilité de l'hydrophone à la pression M_p est obtenue en faisant le rapport des valeurs crêtes de la tension en circuit ouvert $\hat{U}$ à la pression $\hat{p}$, données par les équations (11.1), (11.2) ou (11.3) :

$$M_p = \frac{\hat{U}}{\hat{p}} \quad (11.4)$$

L'étalonnage doit être effectué dans les conditions indiquées aux articles 5 et 6.

La valeur crête de la tension en circuit ouvert aux bornes de l'hydrophone doit être mesurée selon les dispositions du paragraphe 6.3.

Pour obtenir la valeur crête de la pression, on peut 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 erreur inférieure à $\pm 1\%$.

On mesure l'accélération au moyen d'un accéléromètre placé à la base du récipient.

La profondeur de l'immersion h doit être mesurée à partir du centre acoustique de l'hydrophone, en supposant que la position de ce centre soit connue. Si elle ne l'est pas, on peut soit déterminer la position du centre acoustique expérimentalement, selon la bibliographie, référence [68], soit éliminer de l'équation la valeur de h en répétant la mesure à deux profondeurs différentes h_1 et h_2 . Les valeurs crêtes des tensions de sortie de l'hydrophone sont respectivement $\hat{U}_1$ et $\hat{U}_2$.

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 bibliography, page 24, reference [67].)

At very low frequencies, where $h \omega^2$ is small compared with g , equation (11.1) reduces to:

$$\hat{p} = \rho g \hat{x} \quad (11.2)$$

which is independent of the frequency.

At higher frequencies, when $h \omega^2$ becomes large compared with g , the pressure is proportional to the square of the frequency:

$$\hat{p} = \rho \hat{x} h \omega^2 \quad (11.3)$$

The change-over takes place at a frequency

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{h}}$$

which, for example, is 1.6 Hz when $h = 10$ cm.

Hence equation (11.3) is practically valid at frequencies higher than 10 Hz.

11.5 Determination of the sensitivity

The pressure sensitivity of the hydrophone M_p is found as the ratio of the peak values of the open circuit voltage $\hat{U}$ and the pressure $\hat{p}$, given by equations (11.1), (11.2) or (11.3):

$$M_p = \frac{\hat{U}}{\hat{p}} \quad (11.4)$$

The calibration shall be performed under the conditions laid down in Clauses 5 and 6.

The peak value of the open circuit voltage at the terminals of the hydrophone shall be measured in accordance with Sub-clause 6.3.

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 $\hat{x} \omega^2$ should be measured.

The error in the results of these measurements shall be less than $\pm 1\%$.

The acceleration is measured by means of an accelerometer at the bottom of the vessel.

The depth of immersion h should be measured at the acoustic centre of the hydrophone, provided that the position of that centre is known. If not known, either the position of the acoustic centre can be determined experimentally, according to bibliography, reference [68], or the value of h can 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 are respectively $\hat{U}_1$ and $\hat{U}_2$.

Par suite, en posant:

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_1 - \hat{U}_2$$

et

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

les équations (11.3) et (11.4) donnent:

$$\Delta \hat{U} = M_p \rho \hat{x} \omega^2 \Delta h$$

ou encore:

$$M_p = \frac{\Delta \hat{U}}{\Delta h} \frac{1}{\rho \hat{x} \omega^2} \quad (11.5)$$

Dans cette équation, la valeur absolue de la profondeur d'immersion est éliminée et remplacée par la différence entre deux profondeurs d'immersion mesurées séparément. Cette différence peut être obtenue sans qu'il soit nécessaire de connaître la position du centre acoustique de l'hydrophone.

La différence de profondeur doit être mesurée avec une erreur inférieure à $\pm 1\%$.

Note. — Certains hydrophones sont sensibles non seulement à la pression acoustique mais également au gradient de pression et à la vitesse des particules du fluide. Les hydrophones qui répondent à ces modes d'excitations vont engendrer une tension électrique en circuit ouvert qui ne sera pas due uniquement à la pression acoustique; en effet, la vitesse acoustique (valeur crête $\omega \hat{x}$) et le gradient de pression dans la colonne (valeur crête $\frac{d\hat{p}}{dh}$) prennent des valeurs finies. Par conséquent, ces hydrophones ne peuvent pas être étalonnés dans une colonne vibrante.

11.6 Conditions de mesure

11.6.1 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 vibratoire doit être petite par rapport à la dimension de l'hydrophone.

La raideur du récipient doit être suffisamment élevée pour que la plus basse fréquence de résonance du récipient vide soit supérieure à la plus basse fréquence de résonance de la colonne de liquide.

La longueur de la colonne doit être supérieure à son diamètre.

La plus basse fréquence de résonance 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 ces conditions $\left(l \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{4}\right)$, la longueur de la colonne ne doit pas dépasser le seizième de la longueur d'onde du son dans le liquide. (Voir la bibliographie, page 24, référence [67].)

Then, if

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_1 - \hat{U}_2$$

and

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

equations (11.3) and (11.4) give:

$$\Delta \hat{U} = M_p \rho \hat{x} \omega^2 \Delta h$$

or:

$$M_p = \frac{\Delta \hat{U}}{\Delta h} \frac{1}{\rho \hat{x} \omega^2} \quad (11.5)$$

In this equation, the absolute value of the immersion depth is eliminated and replaced by the difference between two immersion depths at two measurements. This difference can be established without knowledge of the location of the acoustic centre of the hydrophone.

The depth difference shall be measured with an error of less than $\pm 1\%$.

Note. — Some hydrophones are sensitive not only to sound pressure, but also to sound pressure gradients and to particle velocity. Because of the finite values of the particle velocity (peak value $\omega \hat{x}$) and of the pressure gradient in the column (peak value $\frac{d\hat{p}}{dh}$), hydrophones that respond to these kinds of excitation will produce an open circuit voltage generated not only by the sound pressure. Therefore, these hydrophones cannot be calibrated in a vibrating column.

11.6 Conditions of measurement

11.6.1 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 should 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 so 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.

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 $\left(l \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda}{4}\right)$ the length of the column should not be larger than one-sixteenth of the wavelength of the sound in the liquid. (See bibliography, page 24, reference [67].)

Aux plus hautes fréquences, la pression acoustique dans la colonne est donnée par l'équation suivante:

$$\hat{p} = \rho \hat{x} \omega^2 h \frac{\sin\left(\frac{\omega h}{c}\right)}{\left(\frac{\omega h}{c}\right) \cos\left(\frac{\omega l}{c}\right)} \quad (11.6)$$

où c est la vitesse du son dans la colonne de liquide compte tenu de la complaisance des parois du récipient et l est la longueur de la colonne.

Notes 1. — Cette équation n'est valable que si l est inférieure au quart de la longueur d'onde du son dans le liquide.

2. — Aux basses fréquences, le terme trigonométrique fractionnaire de cette équation tendant vers l'unité, on retrouve l'équation (11.3).

11.6.2 Acoustiques

Pour être certain que la sensibilité de l'hydrophone mesurée est seulement la sensibilité à la pression, il faut que l'impédance de l'hydrophone soit grande par rapport à l'impédance de la colonne de liquide. La valeur de cette dernière impédance est fonction de la profondeur h , d'après l'équation donnant l'impédance acoustique spécifique Z :

$$Z = j \rho c \operatorname{tg} \frac{\omega h}{c} \quad (11.7)$$

Cette expression s'annule à la surface et croît jusqu'à l'infini à la profondeur d'un quart de longueur d'onde. Cependant, comme la bande de fréquences d'utilisation 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 infinie.

Donc, aucun hydrophone immergé à proximité de la surface, même s'il est du type ayant la plus grande complaisance, ne perturbe le champ acoustique, à condition qu'il 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 de la colonne dépasse le module de l'impédance 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.

On peut vérifier ces assertions en effectuant l'étalonnage à différentes profondeurs.

Avec l'allure de la pression donnée dans l'équation (11.6) la sensibilité de l'hydrophone devrait rester invariante avec la profondeur.

Si, toutefois, la sensibilité varie en fonction du rapport des impédances de l'hydrophone et de la colonne d'eau, l'éventualité d'une erreur de l'étalonnage doit être examinée. Voir l'annexe E.

11.7 Précision

En supposant que la densité du liquide ρ , l'accélération crête à la base du récipient $\hat{x} \omega^2$, la profondeur h et la tension crête de sortie $\hat{U}$ sont mesurées avec une erreur inférieure à $\pm 1\%$, la sensibilité à la pression de l'hydrophone est obtenue avec une erreur probable inférieure à ± 1 dB.