

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
60565**

Première édition
First edition
1977-01

Etalonnage des hydrophones

Calibration of hydrophones



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60565: 1977

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} 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
60565**

Première édition
First edition
1977-01

Etalonnage des hydrophones

Calibration of hydrophones

© IEC 1977 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

X

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
LISTE DES SYMBOLES	8
Articles	
1. Domaine d'application	12
2. Objet	12
3. Définitions	12
3.1 Champ libre	12
3.2 Champ lointain	12
3.3 Centre acoustique	12
3.4 Hydrophone	12
3.5 Projecteur acoustique sous-marin	14
3.6 Transducteur réversible	14
3.7 Transducteur réciproque	14
3.8 Tension en circuit ouvert d'un hydrophone	14
3.9 Sensibilité en champ libre d'un hydrophone	14
3.10 Sensibilité en pression d'un hydrophone	14
3.11 Réponse à l'émission en courant d'un projecteur	16
3.12 Bornes électriques d'un transducteur réciproque	16
3.13 Impédance électrique d'un transducteur	16
3.14 Module de l'impédance électrique de transfert d'un couple de transducteurs	16
3.15 Pistonphone	18
3.16 Colonne vibrante	18
3.17 Pression de bruit équivalente	18
3.18 Dynamique	18
3.19 Réponse directive	18
3.20 Axe principal	18
3.21 Directivité isotrope	18
3.22 Familles de transducteurs directifs	20
3.23 Système de coordonnées	20
4. Procédés d'étalonnage	20
4.1 Principes	20
4.2 Limites de champ	22
4.3 Choix schématique des procédés	22
5. Préparation des transducteurs	22
5.1 Moullage	22
5.2 Support de l'hydrophone	22
5.3 Influence du câble	24
6. Mesures électriques	24
6.1 Forme du signal	24
6.2 Mise à la masse	24
6.3 Mesure de la tension de sortie de l'hydrophone	24
6.4 Mesure du courant traversant le projecteur	26
6.5 Mesure du module de l'impédance de transfert	28
7. Etalonnage en champ libre par réciprocité	30
7.1 Domaine d'application	30
7.2 Objet	30
7.3 Principe général	30
7.4 Théorie	30
7.5 Distance entre émetteur et récepteur	34
7.6 Distance minimale entre transducteurs et surfaces limites	34
7.7 Forme du signal	36
7.8 Limites en fréquence	36
7.9 Mesures	38

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
LIST OF SYMBOLS	9
Clause	
1. Scope	13
2. Purposes	13
3. Definitions	13
3.1 Free field	13
3.2 Far field	13
3.3 Acoustic centre	13
3.4 Hydrophone	13
3.5 Underwater sound projector	15
3.6 Reversible transducer	15
3.7 Reciprocal transducer	15
3.8 Open-circuit voltage at hydrophone	15
3.9 Free-field sensitivity of a hydrophone	15
3.10 Pressure sensitivity of a hydrophone	15
3.11 Transmitting response to current of a projector	17
3.12 Electrical terminals of a reciprocal transducer	17
3.13 Electrical impedance of a transducer	17
3.14 Electrical transfer impedance magnitude of a transducer pair	17
3.15 Pistonphone	19
3.16 Vibrating column	19
3.17 Equivalent noise pressure	19
3.18 Dynamic range	19
3.19 Directional response	19
3.20 Principal axis	19
3.21 Omnidirectionality	19
3.22 Types of directional transducers	21
3.23 Co-ordinate system	21
4. Procedures for calibration	21
4.1 Principles	21
4.2 Field limitations	23
4.3 Schematic survey of procedures	23
5. Preparation of the transducers	23
5.1 Wetting	23
5.2 Hydrophone support	23
5.3 Influence of the cable	25
6. Electrical measurements	25
6.1 Signal type	25
6.2 Earthing	25
6.3 Measurement of hydrophone output voltage	25
6.4 Measurement of projector current	27
6.5 Measurement of transfer impedance magnitude	29
7. Free-field reciprocity calibration	31
7.1 Scope	31
7.2 Object	31
7.3 General principle	31
7.4 Theory	31
7.5 Separation distance	35
7.6 Minimum distance from transducers to boundary surfaces	35
7.7 Signal type	37
7.8 Frequency limitations	37
7.9 Measurements	39

Articles	Pages
8. Etalonnage en champ libre par comparaison	42
8.1 Domaine d'application	42
8.2 Objet	42
8.3 Principe	42
8.4 Comparaison avec un hydrophone étalon	44
8.5 Etalonnage à l'aide d'un projecteur étalonné	46
9. Compensation dans une chambre fermée	48
9.1 Domaine d'application	48
9.2 Objet	48
9.3 Introduction	48
9.4 Etalonnage selon la compensation électrodynamique	48
9.5 Etalonnage selon la compensation piézo-électrique	52
9.6 Réalisation de la chambre de compensation électrodynamique	56
9.7 Réalisation de la chambre de compensation piézo-électrique	58
9.8 Limites pratiques de la méthode de compensation électrodynamique	60
9.9 Limites pratiques de la méthode de compensation piézo-électrique	60
10. Etalonnage avec un pistonphone, entre 1 Hz et 50 Hz (à l'étude)	62
11. Etalonnage avec une colonne vibrante, entre 10 Hz et 3 kHz (à l'étude)	62
ANNEXE A — Mesure du module de l'impédance de transfert par la méthode de substitution	64
ANNEXE B — Mesure du module de l'impédance de transfert par la méthode de lecture directe	70
ANNEXE C — Emploi de la technique par impulsions dans l'étalonnage en champ libre	78
ANNEXE D — Réponse directive d'un hydrophone	84
BIBLIOGRAPHIE	88

Clause	Page
8. Free-field calibration by comparison	43
8.1 Scope	43
8.2 Object	43
8.3 Principle	43
8.4 Comparison with a standard hydrophone	45
8.5 Calibration with a calibrated projector	47
9. Compensation in a closed chamber	49
9.1 Scope	49
9.2 Object	49
9.3 Introduction	49
9.4 Calibration by electrodynamic compensation	49
9.5 Calibration by piezoelectric compensation	53
9.6 Design of the electrodynamic compensation chamber	57
9.7 Design of the piezoelectric compensation chamber	59
9.8 Practical limitations of the electrodynamic compensation method	61
9.9 Practical limitations of the piezoelectric compensation method	61
10. Calibration with a pistonphone, between 1 Hz and 50 Hz (under consideration)	63
11. Calibration with a vibrating column, between 10 Hz and 3 kHz (under consideration)	63
APPENDIX A — Measurement of transfer impedance magnitude by the substitution method	65
APPENDIX B — Measurement of the transfer impedance magnitude by the direct read-out method	71
APPENDIX C — Pulse technique in free-field calibration	79
APPENDIX D — Directional response of a hydrophone	85
BIBLIOGRAPHY	88

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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: Electroacoustique.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Vedbaek en 1968, à Stresa en 1969, à Londres en 1971, à Oslo en 1972 et à Moscou en 1974. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 29D(Bureau Central)8, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en février 1975.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Allemagne	Pays-Bas
Australie	Pologne
Autriche	Roumanie
Belgique	Royaume-Uni
Chine	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
France	Union des Républiques Socialistes
Israël	Soviétiques
Japon	

Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:

- Publications n°s 27: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique.
- 50(08): Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), chapitre 08: Electroacoustique.
- 263: Echelles et dimensions des graphiques pour le tracé des courbes de réponse en fréquence et des diagrammes polaires.
- 486: Méthode de précision pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons à condensateur d'un pouce par la technique de la réciprocité.
- 500: Hydrophone étalon CEI.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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 the meetings held in Vedbaek in 1968, in Stresa in 1969, in London in 1971, in Oslo in 1972 and in Moscow in 1974. As a result of the latter meeting, a draft, Document 29D(Central Office)8, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in February 1975.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Poland
Austria	Romania
Belgium	Sweden
China	Switzerland
Denmark	Turkey
France	Union of Soviet Socialist Republics
Germany	United Kingdom
Israel	United States of America
Japan	
Netherlands	

Other IEC publications quoted in this standard:

Publications Nos. 27:	Letter Symbols to be Used in Electrical Technology.
50(08):	International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), Chapter 08, Electro-acoustics.
263:	Scales and Sizes for Plotting Frequency Characteristics and Polar Diagrams.
486:	Precision Method for Free-field Calibration of One-inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique.
500:	IEC Standard Hydrophone.

LISTE DES SYMBOLES

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	Complaisance acoustique des parois de la chambre
C_{mt}	Complaisance mécanique de la chambre
C_t	Complaisance acoustique de la chambre
C_w	Complaisance acoustique du volume d'eau dans la chambre
c	Vitesse du son dans l'eau
D	Diamètre moyen de la coque cylindrique
D_1	Indice de directivité
d	Distance entre projecteur et hydrophone
d_{31}	Module piézo-électrique
E	Module de Young
f	Fréquence
g	Accélération de la pesanteur
H	Facteur de correction de dimension dans l'équation (A9)
h	Hauteur de la colonne d'eau
I	Courant
I_P	Courant à travers le projecteur
I_T	Courant à travers le transducteur
I_c	Courant de compensation à travers le projecteur d'équilibre
K	Atténuation de l'atténuateur étalonné
L	Longueur de la cuve ou de la chambre
l	Longueur du conducteur de la bobine du transducteur
M_t	Sensibilité en champ libre
M_H	Sensibilité en champ libre de l'hydrophone
M_T	Sensibilité en champ libre du transducteur
M_p	Sensibilité en pression
M_o	Constantes de sensibilité (annexe B)
m	Masse d'eau à l'intérieur de la chambre
p	Pression acoustique
R	Résistance
R_c	Résistance de mesure du courant
R_i	Résistance de tension insérée
R_θ	Facteur de directivité
r	Rayon de l'enveloppe du transducteur
dS	Élément différentiel de surface sur une sphère
S	Réponse à l'émission en courant
S_P	Réponse à l'émission en courant d'un projecteur
S_T	Réponse à l'émission en courant d'un transducteur
t	Épaisseur d'une coque cylindrique
U	Tension
U_c	Tension de compensation au projecteur d'équilibre
U_H	Tension en circuit ouvert d'un hydrophone
U_P	Tension d'alimentation de projecteur
U_R	Tension aux bornes d'une résistance
U_T	Tension d'alimentation de transducteur

LIST OF SYMBOLS

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_{mt}	Mechanical compliance of chamber
C_t	Acoustical compliance of chamber
C_w	Acoustical compliance of water volume in chamber
c	Speed of sound in water
D	Mean diameter of cylindrical shell
D_i	Directivity index
d	Distance between projector and hydrophone
d_{31}	Piezoelectric modulus
E	Young's modulus
f	Frequency
g	Gravitational constant
H	Dimensional correction factor in equation (A9)
h	Height of water column
I	Current
I_P	Current through projector
I_T	Current through transducer
I_c	Compensation current through null projector
K	Attenuation of calibrated attenuator
L	Length of tank or chamber
l	Conductor length of transducer coil
M_t	Free field sensitivity
M_H	Free field sensitivity of hydrophone
M_T	Free field sensitivity of transducer
M_p	Pressure sensitivity
M_o	Sensitivity constants (Appendix B)
m	Mass of water inside chamber
p	Sound pressure
R	Resistance
R_c	Current measuring resistance
R_i	Insert voltage resistance
R_θ	Directivity factor
r	Radius of transducer shell
dS	Differential area on a sphere
S	Transmitting response to current
S_P	Transmitting response to current of a projector
S_T	Transmitting response to current of a transducer
t	Thickness of cylindrical shell
U	Voltage
U_c	Compensating voltage at null projector
U_H	Open circuit voltage at hydrophone
U_P	Transmitting voltage at projector
U_R	Voltage across resistor
U_T	Transmitting voltage at transducer

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
U_{PT}	Tension en circuit ouvert d'un transducteur, à partir d'un projecteur de source sonore
V	Volume d'eau
x	Déplacement du transducteur d'équilibre, amplitude de vibration
Y	Facteur de transmission d'atténuateur
Z	Impédance
Z_{RC}	Impédance de circuit R-C
Z_{PH}	Impédance de transfert d'un projecteur et d'un hydrophone
Z_{TH}	Impédance de transfert d'un transducteur et d'un hydrophone
Z_{PT}	Impédance de transfert d'un transducteur et d'un projecteur
γ	Gain d'un amplificateur
θ	Angle vertical
λ	Longueur d'onde du son dans l'eau
ρ	Masse volumique de l'eau
σ	Coefficient de Poisson
φ	Angle d'azimut
κ	Rapport des chaleurs spécifiques

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60565:1977

U_{PH}	Open circuit voltage at hydrophone, from a projector as sound source
U_{TH}	Open circuit voltage at hydrophone, from a transducer as sound source
U_{PT}	Open circuit voltage at transducer, from a projector as sound source
V	Water volume
x	Displacement of null transducer, vibration amplitude
Y	Transmission factor of attenuator
Z	Impedance
Z_{RC}	Impedance of R-C circuit
Z_{PH}	Transfer impedance of projector and hydrophone
Z_{TH}	Transfer impedance of transducer and hydrophone
Z_{PT}	Transfer impedance of transducer and projector
γ	Gain of amplifier
θ	Vertical angle
λ	Wavelength of sound in water
ρ	Density of water
σ	Poisson's modulus
φ	Azimuth angle
κ	Ratio of specific heats

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60565:1977

ÉTALONNAGE DES HYDROPHONES

1. Domaine d'application

La présente norme spécifie les méthodes de mesure de la sensibilité d'un hydrophone, en particulier dans la bande de fréquences 1 Hz à 1 MHz. Elle établit les règles de présentation des résultats d'étalonnage.

2. Objet

Définir les procédés d'étalonnage d'hydrophones.

3. Définitions

Les symboles littéraux, la terminologie et les échelles et formats des diagrammes doivent être conformes aux Publications 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique; 50(08) de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), chapitre 08: Electroacoustique; 263 de la CEI: Echelles et dimensions des graphiques pour le tracé des courbes de réponse en fréquence et des diagrammes polaires, et à la Norme ISO 31.

3.1 *Champ libre*

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

3.2 *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.

Notes 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. Par suite, la pression due à la source acoustique est inversement proportionnelle à la distance de la source.

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.

3.3 *Centre acoustique*

Point sur ou au voisinage d'un transducteur d'où semblent provenir les ondes sphériques divergentes émises par le transducteur et observables en des points éloignés.

3.4 *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.

CALIBRATION OF HYDROPHONES

1. Scope

This standard specifies methods for the measurement of the sensitivity of hydrophones, particularly in the frequency range from 1 Hz to 1 MHz, and establishes rules for the presentation of the calibration data.

2. Purpose

To establish procedures for the calibration of hydrophones.

3. Definitions

Letter symbols, terminology and scales and sizes of graphic data representation shall be in accordance with IEC Publications 27, Letter Symbols to be Used in Electrical Technology; 50(08), International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), Chapter 08: Electro-acoustics; 263, Scales and Sizes for Plotting Frequency Characteristics and Polar Diagrams, and ISO Standard 31.

3.1 Free field

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

3.2 Far field

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

Notes 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.

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.

3.3 Acoustic centre

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

3.4 Hydrophone

A transducer that produces electric signals in response to waterborne 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.

3.5 *Projecteur acoustique sous-marin*

Transducteur électroacoustique qui transforme des signaux électriques en signaux sonores se propageant dans l'eau.

Note. — Dans cette norme, un projecteur acoustique sous-marin est désigné simplement par « projecteur ».

3.6 *Transducteur réversible*

Transducteur pouvant fonctionner aussi bien comme projecteur que comme hydrophone.

3.7 *Transducteur réciproque*

Transducteur linéaire, passif, réversible.

3.8 *Tension en circuit ouvert d'un hydrophone*

Tension apparaissant aux bornes électriques d'un hydrophone non chargé électriquement.

Symbole: U_H .

Unité: volt, V.

Notes 1. — Dans cette norme, tous les courants, tensions, pressions acoustiques sont exprimés en valeurs efficaces, sauf indication contraire.

2. — Si une charge électrique est branchée à l'hydrophone, par exemple un câble, un transformateur ou un amplificateur, la tension en circuit ouvert est définie comme la tension apparaissant entre les bornes électriques de l'hydrophone, telle qu'elle est mesurée par la méthode de la tension insérée (voir le paragraphe 6.3.2).

3.9 *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 acoustique de l'hydrophone si ce dernier était retiré.

Symbole: M_i .

Unité: volt par pascal, V/Pa.

Notes 1. — La pression peut soit être sinusoïdale, soit provenir de bruit filtré en bande étroite, la moyenne géométrique des limites de la bande des fréquences étant considérée comme la fréquence à retenir.

2. — On précisera à la fois la fréquence de mesure et les bornes électriques auxquelles la sensibilité se rapporte.

3. — Le terme de « réponse » est parfois employé à la place de « sensibilité ».

3.9.1 *Niveau de sensibilité en champ libre*

Vingt fois le logarithme à base 10 du rapport de la sensibilité en champ libre M_i à la sensibilité de référence M_{ref} .

Notes 1. — M_{ref} est égal à 1 V/μPa.

Unité: décibel, dB.

2. — 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} .

3.10 *Sensibilité en pression d'un hydrophone*

Rapport de la tension de sortie à la pression acoustique existant réellement dans la région de l'hydrophone destiné à recueillir les signaux sonores.

Voir les notes 2 et 3 du paragraphe 3.9.

Symbole: M_p .

Unité: volt par pascal, V/Pa.

3.5 Underwater sound projector

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

Note. — For the purpose of this standard, an underwater sound projector is called a “projector”.

3.6 Reversible transducer

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

3.7 Reciprocal transducer

A linear, passive, reversible transducer.

3.8 Open-circuit voltage at hydrophone

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

Symbol: U_H .

Unit: volt, V.

Notes 1. — Throughout this standard, all voltages, currents and sound pressures are root mean square quantities, unless otherwise stated.

2. — If any electrical load, such as a cable, a transformer or an amplifier, is connected to the hydrophone, the open circuit voltage is defined as the voltage appearing at the electrical terminals of the hydrophone as measured by the “insertion voltage technique” (see Sub-clause 6.3.2).

3.9 Free-field sensitivity of a hydrophone

The ratio of the open circuit voltage of the hydrophone to the sound pressure in the undisturbed free field in the position of the acoustic centre of the hydrophone if the hydrophone were removed.

Symbol: M_f .

Unit: volt per pascal, V/Pa.

Notes 1. — The pressure may be either sinusoidal or narrow band filtered noise, the geometric mean value between the frequency band limits being considered as the given frequency.

2. — The frequency as well as the terminals to which the sensitivity refers shall be specified.

3. — The term “response” is sometimes used instead of “sensitivity”.

3.9.1 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} .

Notes 1. — M_{ref} is equal to 1 V/ μ Pa.

Unit: decibel, dB.

2. — 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.

3.10 Pressure sensitivity of a hydrophone

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

See Notes 2 and 3 of Sub-clause 3.9.

Symbol: M_p .

Unit: volt per pascal, V/Pa.

3.10.1 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} .

Unité: décibel, dB.

3.11 Réponse à l'émission en courant d'un projecteur

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

La distance de référence est de 1 m.

Symbole: S .

Unité: pascal mètre par ampère, Pa m/A.

3.11.1 Niveau de réponse à l'émission

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

Unité: décibel, dB.

Note. — S_{ref} est égale à 1 μ Pa m/A.

3.12 Bornes électriques d'un transducteur réciproque

Bornes où l'on mesure aussi bien la tension en circuit ouvert en fonctionnement en hydrophone que le courant absorbé en fonctionnement en projecteur.

Note. — Lorsque le transducteur est immergé dans l'eau, on appelle « borne basse » celle dont l'impédance par rapport à l'eau est la plus faible. Par voie de conséquence, l'autre borne est appelée « borne haute » (voir le paragraphe 6.3.2).

3.13 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.

Symbole: Z .

Unité: ohm, Ω .

Note. — Puisque cette impédance dépend des conditions d'environnement, de la pression hydrostatique et de la longueur du câble de liaison du transducteur, ces paramètres, ainsi que la fréquence et le repère des bornes de mesure de l'impédance, doivent être précisés.

3.14 Module de l'impédance électrique de transfert d'un couple de transducteurs

Rapport de la tension en circuit ouvert U_H recueillie à la sortie de l'hydrophone au courant I_P traversant le projecteur, à condition que le projecteur et l'hydrophone soient placés en champ libre, leurs axes principaux étant alignés et dirigés l'un vers l'autre.

Symbole: $|Z_{PH}|$.

$$|Z_{PH}| = \frac{U_H}{I_P} \quad (3.1)$$

Unité: ohm, Ω .

Notes 1. — La définition de l'axe principal est donnée au paragraphe 3.20.

2. — Puisque la valeur de cette impédance dépend des conditions d'environnement et des charges électriques du projecteur et de l'hydrophone, ces paramètres, ainsi que le repère des bornes de mesure de la tension et du courant, doivent être précisés.

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 acoustiques du projecteur et de l'hydrophone.

$$Z_{PH} d = \text{constante} \quad (3.2)$$

3.10.1 Pressure sensitivity level

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

Unit: decibel, dB.

3.11 Transmitting response to current of a projector

At a given frequency and in a specified direction, the ratio of the sound pressure at a reference distance from the acoustic centre of a projector, multiplied by that reference distance, to the current flowing through the electrical terminals.

Reference distance is 1 m.

Symbol: S .

Unit: pascal metre per ampere, Pa m/A.

3.11.1 Transmitting response level

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

Unit: decibel, dB.

Note. — S_{ref} is equal to 1 μ Pa m/A.

3.12 Electrical terminals of a reciprocal transducer

Those terminals where the open circuit hydrophone voltage is measured, as well as the projector current.

Note. — If the transducer is immersed in water, the terminal with the lowest impedance with respect to water is called the "low terminal". Consequently, the other terminal is called the "high terminal" (see Sub-clause 6.3.2).

3.13 Electrical impedance of a transducer

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

Symbol: Z .

Unit: ohm, Ω .

Note. — Because this impedance depends on the field conditions, the hydrostatic pressure and the length of the cable attached to the transducer, these parameters, as well as the frequency and the terminals where the impedance is measured, shall be specified.

3.14 Electrical transfer impedance magnitude of a transducer pair

The ratio of the open circuit voltage U_H across the hydrophone terminals to the 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.

Symbol: $|Z_{PH}|$.

$$|Z_{PH}| = \frac{U_H}{I_P} \quad (3.1)$$

Unit: ohm, Ω .

Notes 1. — Definition of principal axis is given in Sub-clause 3.20.

2. — Because this impedance magnitude depends on the field conditions and the electrical load conditions of the projector and the hydrophone, these conditions as well as the terminals where the voltage and the current are measured, shall be 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 acoustic centres of the projector and the hydrophone:

$$Z_{PH} d = \text{constant} \quad (3.2)$$

3.15 *Pistonphone*

Appareil constitué d'un piston rigide animé d'un mouvement alternatif de fréquence et d'amplitude connues, permettant d'établir une pression acoustique connue dans un récipient fermé de petites dimensions.

Note. — La plus grande dimension du volume clos doit, en principe, être suffisamment faible par rapport à la longueur d'onde du son dans le milieu considéré.

Voir l'article 10 (à l'étude).

3.16 *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. — La longueur de la colonne doit, en principe, être suffisamment faible par rapport à la longueur d'onde du son dans l'eau. Le diamètre de la colonne doit être faible comparé à sa longueur.

Voir l'article 11 (à l'étude).

3.17 *Pression de bruit équivalente*

Pression acoustique qui doit, en principe, être appliquée à l'hydrophone pour que sa tension de sortie soit égale à la tension de bruit mesurée aux mêmes bornes 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.

Voir la bibliographie, référence [11]*.

3.18 *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.

3.19 *Réponse directive*

Description, généralement sous forme de diagrammes, de la réponse d'un transducteur électro-acoustique en fonction de la direction de propagation du son rayonné ou incident dans un plan défini passant par le centre acoustique et à une fréquence donnée (voir l'annexe D).

3.20 *Axe principal*

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

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

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

3.21 *Directivité isotrope*

Lorsque la réponse d'un transducteur reste comprise entre certaines limites lorsqu'on change de direction, la réponse est appelée « isotrope » dans les limites considérées.

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 acoustique.

* Les références entre crochets se rapportent à la bibliographie, pages 88-90.

3.15 *Pistonphone*

An 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 10 (under consideration).

3.16 *Vibrating column*

An instrument 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. — 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 must be small compared with its length.

See Clause 11 (under consideration).

3.17 *Equivalent noise pressure*

The sound pressure that must be applied at the hydrophone to cause a voltage at the hydrophone terminals equal to the noise voltage present at the same 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.

See bibliography, reference [11] *.

3.18 *Dynamic range*

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

3.19 *Directional response*

A 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 acoustic centre and at a specified frequency (see Appendix D).

3.20 *Principal axis*

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

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

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

3.21 *Omnidirectionality*

If the response of a transducer shows variations smaller than a given limit as the direction is changed, the response is called “omnidirectional” within the given limit.

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 acoustic centre.

* References in these brackets refer to the bibliography, pages 88-90.

3.22 Familles de transducteurs directifs

Les transducteurs peuvent être classés selon leur directivité.

Un transducteur POINT est isotrope dans toutes les directions et peut avoir son axe dans n'importe quelle direction.

Un transducteur LIGNE est équidirectif dans un plan et peut avoir son axe sur n'importe quelle droite de ce plan.

Un transducteur DOUBLET est bidirectif et a deux axes dans des directions opposées.

Un transducteur PISTON PLAT est unidirectif et a son axe unique généralement perpendiculaire à la surface du piston.

Un transducteur unidirectif est un 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.

Voir [55] à [59].

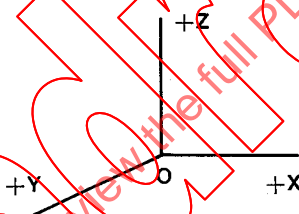
3.23 Système de coordonnées

Le système de coordonnées lors du tracé de la courbe de directivité, effectué en sens inverse des aiguilles d'une montre (voir la figure 1), sera le suivant:

transducteur ligne: ligne centrale de symétrie sur l'axe OZ;

transducteur doublet: les deux éléments symétriques par rapport au point O, sur l'axe +Z et -Z;

transducteur piston: plan du piston dans le plan ZOY. Axe principal colinéaire à OX.



170/77

FIG. 1. — Système de coordonnées en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Voir [11].

Voir l'annexe D.

4. Procédés d'étalonnage

4.1 Principes

Les procédés d'étalonnage des hydrophones sont spécifiés d'après les principes suivants:

1) Etalonnage sans transducteur étalon

Ce type d'étalonnage englobe les procédés suivants:

a) Etalonnage par réciprocité

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

b) Etalonnage par grandeur physique

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

3.22 Types of directional transducers

A transducer can be classified according to its directionality:

A POINT transducer is omnidirectional in all planes and may have its axis in any direction.

A LINE transducer is omnidirectional in one plane and may have its axis in any direction within that plane.

A DIPOLE transducer is bidirectional and has two axes in opposite directions.

A FLAT PISTON transducer is unidirectional and has one axis, generally perpendicular to the piston surface.

A unidirectional transducer is a transducer which is responsive predominantly to sound radiated or incident within a solid angle not greater than one hemisphere.

See [55] to [59].

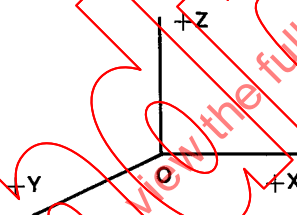
3.23 Co-ordinate system

The directivity pattern shall be plotted in reference to a "left-hand" co-ordinate system (see Figure 1) in the following way:

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.



170/77

FIG. 1. — "Left-hand" co-ordinate system.

See [11].

See Appendix D.

4. Procedures for calibration

4.1 Principles

Procedures for the calibration of hydrophones are specified by the following principles:

1) Calibration without a standard transducer

This type of calibration covers:

a) Reciprocity calibration

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

b) Physical calibration

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

2) *Étalonnage à l'aide d'un transducteur étalon*

En utilisant un hydrophone étalon connu, on peut étalonner par comparaison un hydrophone ou un projecteur. Dans ce dernier cas, le projecteur ainsi étalonné peut servir à l'étalonnage d'un autre hydrophone.

4.2 *Limites de champ*

Selon les limites du champ acoustique, on peut distinguer deux sortes d'étalonnages:

1) *Étalonnage en champ libre*

Les limites du champ acoustique sont telles que l'étalonnage est possible dans les conditions de champ libre (voir le paragraphe 3.1).

2) *Étalonnage en chambre de petites dimensions*

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 les paragraphes 9.6 et 9.7).

4.3 *Choix schématique des procédés*

L'examen des différents principes et des conditions restrictives dans le champ acoustique, en rapport avec la bande de fréquences, conduit à envisager les différents procédés suivants:

- | | |
|---|-------------------|
| 1) Étalonnage en champ libre par réciprocité | article 7 |
| — étalonnage sans transducteur étalon en champ libre, entre 1 kHz et 1 MHz. | |
| 2) Étalonnage en champ libre par comparaison | article 8 |
| — étalonnage avec un transducteur étalon en champ libre, entre 100 Hz et 1 MHz. | |
| 3) Compensation dans une chambre fermée | article 9 |
| — étalonnage par grandeur physique, sans transducteur étalon, dans une chambre fermée, entre 0.1 Hz et 5 kHz. | |
| 4) Étalonnage avec un pistonphone ou une colonne vibrante | articles 10 et 11 |
| — étalonnage par grandeur physique, sans transducteur étalon, dans une petite chambre, entre 1 Hz et 3 kHz. | (à l'étude) |

5. **Préparation des transducteurs**

Avant d'effectuer l'étalonnage proprement dit, il est nécessaire de procéder à une préparation très soignée des transducteurs selon les indications des paragraphes suivants:

5.1 *Mouillage*

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

5.2 *Support de l'hydrophone*

Le support de l'hydrophone ne doit en aucune manière influencer sur sa sensibilité et ne doit pas non plus permettre de recueillir du bruit.

Une suspension réalisée avec des fils fins ou avec des amortisseurs en caoutchouc souple peut permettre un maintien correct.

2) *Calibration with a standard transducer*

A hydrophone or a projector can be calibrated by comparison with a calibrated standard hydrophone. In the latter case, the calibrated projector can be used to calibrate another hydrophone.

4.2 *Field limitations*

According to the limitations of the sound field, two types of calibration can be distinguished:

1) *Free field calibration*

The boundaries of the sound field are such that calibration is possible in free field conditions (see Sub-clause 3.1).

2) *Small chamber calibration*

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 Sub-clauses 9.6 and 9.7).

4.3 *Schematic survey of procedures*

Considerations of the different principles and of the limitations in the sound field and in the frequency range lead to the following different procedures:

- | | |
|---|-----------------------|
| 1) Free field reciprocity calibration | Clause 7 |
| — calibration without a standard transducer in a free field, between 1 kHz and 1 MHz. | |
| 2) Free field calibration by comparison | Clause 8 |
| — calibration with a standard transducer in a free field, between 100 Hz and 1 MHz. | |
| 3) Compensation in a closed chamber | Clause 9 |
| — physical calibration without a standard transducer in a closed chamber, between 0.1 Hz and 5 kHz. | |
| 4) Calibration with a pistonphone or a vibrating column | Clauses 10 and 11 |
| — physical calibration without a standard transducer in a small chamber, between 1 Hz and 3 kHz. | (under consideration) |

5. **Preparation of the transducers**

Prior to the actual calibration procedure, careful preparation of the transducers is necessary, as outlined in the following sub-clauses:

5.1 *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 should be applied to the whole transducer surface. No dry patches should be visible on the transducer when it is immersed and then removed from the water.

5.2 *Hydrophone support*

The hydrophone should be supported in such a way that the sensitivity cannot be affected and structure borne noise cannot be picked up.

Suspension on thin wires or resilient mounting with rubber springs may offer a good way of support.

5.3 Influence du câble

Si, pour les besoins de l'étalonnage, le câble de liaison de l'hydrophone doit être rallongé, on mesure séparément la capacité de la partie rajoutée afin de calculer l'affaiblissement du signal qu'elle apporte.

Il faut éviter des longueurs de câble dépassant un dixième de la longueur d'onde à la fréquence la plus haute.

6. Mesures électriques

6.1 Forme du signal

Le signal utilisé lors de l'étalonnage peut être sinusoïdal ou provenir de bruit filtré. Dans le cas d'un signal sinusoïdal, les fréquences ne doivent pas être espacées de plus de un tiers d'octave. Selon la Norme ISO 266, les fréquences suivantes sont préconisées.

1,0 Hz; 1,25 Hz; 1,6 Hz; 2,0 Hz; 2,5 Hz; 3,15 Hz; 4,0 Hz; 5,0 Hz;
6,3 Hz; 8,0 Hz et 10,0 Hz et leurs multiples décimaux.

Cependant, au voisinage de la résonance, les intervalles doivent être réduits.

Le bruit filtré doit provenir d'un générateur de bruit « rose ». Le bruit rose est défini comme ayant une densité spectrale de puissance inversement proportionnelle à la fréquence. Par suite, la puissance dans une bande (f_1, f_2) est proportionnelle à $\ln(f_2/f_1)$.

6.2 Mise à la masse

Afin d'éviter les boucles de masse, les bornes électriques des transducteurs ne doivent pas être en contact avec l'eau. Les parties métalliques extérieures d'un hydrophone ne doivent servir de connexion de masse que pour l'écran du câble de l'hydrophone et pour le boîtier de l'amplificateur, à l'exception de tous les autres contacts de masse.

6.3 Mesure de la tension de sortie de l'hydrophone

6.3.1 Mesure directe

La tension en circuit ouvert de l'hydrophone peut être mesurée directement à l'aide d'un voltmètre étalonné, dont l'impédance d'entrée est égale à au moins 100 fois l'impédance électrique de sortie de l'hydrophone. Ce voltmètre doit être étalonné avec une précision supérieure à 1%.

6.3.2 Méthode de la tension insérée

La méthode de la tension insérée est utilisée pour mesurer la tension en circuit ouvert d'un hydrophone chargé électriquement ou lorsque le gain de la chaîne amplificatrice n'est pas connu avec précision (voir la figure 2, page 26).

Une faible résistance R_i , comprise entre 1 Ω et 100 Ω , est connectée en série à la borne basse de l'hydrophone, et une tension d'étalonnage connue lui est appliquée. On applique alternativement une pression acoustique et une tension d'étalonnage de même fréquence. Lorsque la tension

5.3 *Influence of the cable*

If the cable to the hydrophone must be lengthened for the purpose of the calibration, the capacitance of the extension cable is measured separately, in order to calculate the signal attenuation due to the extension.

Cable lengths exceeding 0.1 wavelength at the highest frequency should be avoided.

6. **Electrical measurements**

6.1 *Signal type*

The signal used for the calibration may be either sinusoidal or filtered noise. The frequencies for sine wave signals are to be chosen with intervals not larger than one-third octave. According to ISO Standard 266, the following frequencies are recommended:

1.0 Hz; 1.25 Hz; 1.6 Hz; 2.0 Hz; 2.5 Hz; 3.15 Hz; 4.0 Hz; 5.0 Hz;
6.3 Hz; 8.0 Hz and 10.0 Hz and 10-fold multiples of this series.

However, if resonance occurs, closer spaced frequency points have to be chosen.

Filtered noise will be taken from a noise generator producing pink noise. Pink noise is defined as having a power spectral density inversely proportional to frequency. Therefore, the power in a band (f_1, f_2) is proportional to $\ln(f_2/f_1)$.

6.2 *Earthing*

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

6.3 *Measurement of hydrophone output voltage*

6.3.1 *Direct measurement*

The open circuit voltage of the hydrophone can be measured directly with the aid of a calibrated voltmeter, having an input impedance at least 100 times the electrical impedance at the hydrophone terminals. The voltmeter shall be calibrated with an accuracy better than 1%.

6.3.2 *Insert voltage technique*

The insert voltage technique is used to determine the open circuit voltage of a hydrophone when it is electrically loaded or when the gain of the amplifier chain is uncertain (see Figure 2, page 27).

A small resistor R_i , usually in the range of 1 Ω to 100 Ω , is connected in series with the low terminal of the hydrophone, and a known calibration voltage is applied across it. Let a sound pressure and a calibration voltage of the same frequency be applied alternately. When the

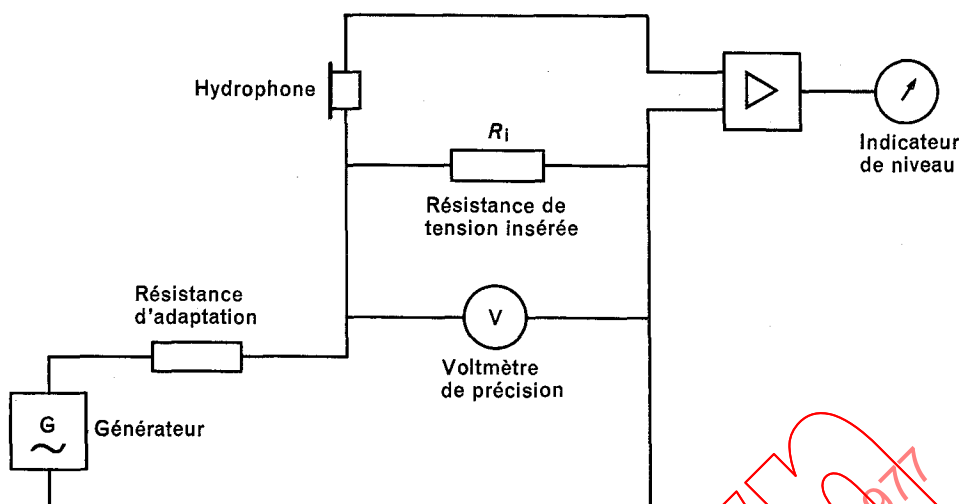


FIG. 2. — Technique de tension insérée.

d'étalonnage est ajustée de façon à donner le même niveau que celui qui est provoqué par la pression acoustique, la valeur de la tension en circuit ouvert est égale à celle de la tension d'étalonnage.

La précision du voltmètre doit être supérieure à 1%.

Notes 1. — Si l'hydrophone comprend un préamplificateur incorporé, relié par un long câble aux instruments de mesure, il est préférable de ne pas mesurer la tension insérée directement, mais de déterminer le courant circulant dans la résistance R_i . Dans ce cas, la précision de R_i doit être supérieure à 1%.

Se référer à la Publication 500 de la CEI, Hydrophone étalon CEI.

2. — L'impédance due aux capacités des fils de liaison entre eux et à leurs capacités par rapport à la masse doit être supérieure à $100 R_i$.
3. — La méthode de la tension insérée permet en outre de mesurer le gain du préamplificateur.
4. — La résistance d'adaptation de la figure 2 sert à adapter la résistance relativement faible R_i à la résistance de charge plus élevée du générateur très souvent nécessaire.

6.3.3 Bruit

Le niveau de bruit ou d'autres parasites, tels que diaphonie, d'origine électrique ou acoustique, devra être au moins inférieur de 20 dB au signal. Dans le cas d'un signal continu, la diaphonie devra être au moins inférieure de 40 dB au signal utile.

Voir [10], [31] et [32].

Note. — Le niveau de bruit parasite peut être réduit par l'emploi d'un filtre passe-bande suffisamment large pour laisser passer le signal sans distorsion.

6.4 Mesure du courant traversant le projecteur

6.4.1 Mesure directe

Le courant traversant le projecteur peut être mesuré directement en insérant un ampèremètre étalonné en série avec la borne basse du projecteur.

Cet ampèremètre doit être étalonné avec une précision meilleure que 1%. S'il est inséré en série avec la borne haute du projecteur, il faut s'efforcer d'éviter les impédances parasites par rapport à la masse, qui sont alors en parallèle avec l'impédance du projecteur.

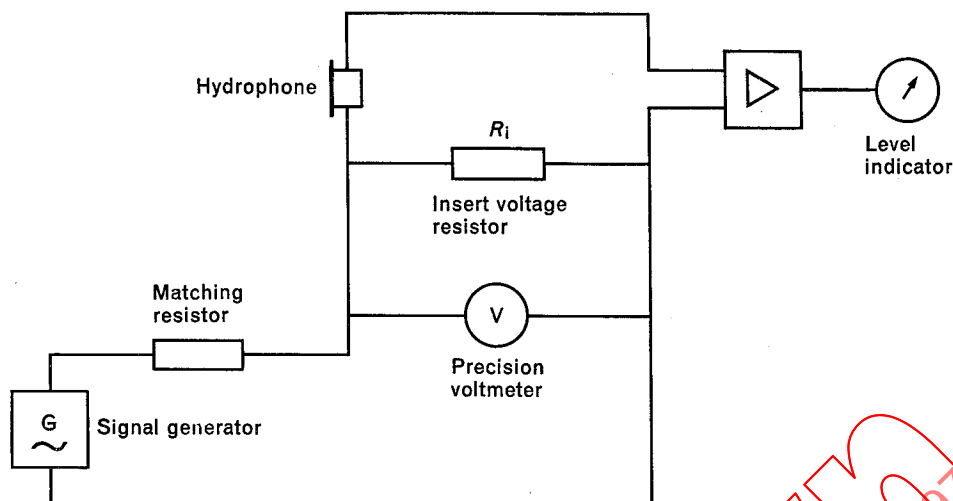


FIG. 2. — Insert voltage technique.

calibration voltage is adjusted until it gives the same level reading as that which results from the sound pressure on the hydrophone, the open circuit voltage will be equal in magnitude to the calibrating voltage.

The accuracy of the voltmeter shall be better than 1%.

Notes 1. — If the hydrophone is equipped with a built-in preamplifier, connected by a long cable to a measuring station, it is a matter of convenience not to measure the insert voltage directly, but to measure the current flowing through R_i . In that case, the accuracy of R_i shall be better than 1%.

Reference is made to IEC Publication 500, IEC Standard Hydrophone.

2. — The impedance due to the capacitance between the cable leads, combined with the capacitance of each cable lead to ground, must be higher than $100 R_i$.
3. — The insert voltage technique also enables the pre-amplifier gain to be measured.
4. — The matching resistor in Figure 2 serves to match the relatively low resistance of R_i to the usually required higher load resistance of the signal generator.

6.3.3 Noise

The level of the noise or other interference such as crosstalk, whether of acoustical or electrical origin, shall be at least 20 dB lower than the signal level. In the case of a continuous signal the crosstalk level shall be at least 40 dB lower than the signal level.

See [10], [31] and [32].

Note. — The level of the interfering noise can be reduced by the use of a band-pass filter of a bandwidth sufficiently wide to let the signal pass without distortion.

6.4 Measurement of projector current

6.4.1 Direct measurement

The projector current can be measured directly by means of a calibrated current meter, connected in series with the low terminal of the projector.

This current meter shall be calibrated with an accuracy of better than 1%. If the current meter is inserted in series with the high terminal of the projector, care must be taken to avoid stray impedance to earth that shunts the impedance of the projector.

6.4.2 Mesure indirecte

On insère en série avec la borne basse du projecteur une résistance de faible valeur R_e généralement comprise entre $1\ \Omega$ et $100\ \Omega$. La tension aux bornes de cette résistance est proportionnelle au courant traversant le projecteur. On mesure cette tension avec un voltmètre calibré.

Lorsqu'une borne de la résistance en série est reliée à la masse, soit le projecteur, soit le circuit de sortie de l'amplificateur de puissance est flottant.

La précision de la valeur de la résistance ainsi que celle de l'étalonnage du voltmètre doivent être meilleures que 1%.

La valeur de l'impédance par rapport à la masse en parallèle avec la résistance de mesure du courant R_e doit être supérieure à $100\ R_e$.

6.5 Mesure du module de l'impédance de transfert

6.5.1 Méthode indirecte

Le module de l'impédance de transfert d'un couple de transducteurs peut être calculé par le quotient de la tension en circuit ouvert U de l'hydrophone par le courant I traversant le projecteur (voir le paragraphe 3.14).

6.5.2 Méthode différentielle

Lorsque le courant traversant le projecteur est mesuré indirectement à l'aide d'une résistance série connue (voir le paragraphe 6.4.2), la tension en circuit ouvert de l'hydrophone peut être mesurée avec le même voltmètre utilisé lors de la mesure de la chute de tension aux bornes de la résistance précédente. Dans ce cas, le voltmètre peut ne pas être calibré de façon absolue. Seuls l'atténuateur et l'échelle de l'appareil à aiguille doivent avoir une exactitude meilleure que 1%.

Lorsqu'on connecte le voltmètre du circuit d'émission au circuit de réception, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de changements dans les circuits de masse.

6.5.3 Méthode de substitution

Lorsque le courant dans le projecteur peut être mesuré à l'aide d'une résistance série connue (voir le paragraphe 6.4.2) et si la tension en circuit ouvert de l'hydrophone peut être déterminée par la méthode de tension insérée (voir le paragraphe 6.3.2), il n'est plus nécessaire de disposer d'un voltmètre calibré pour calculer le module de l'impédance de transfert, car on utilise une méthode de substitution (voir l'annexe A).

6.5.4 Méthode de lecture directe

La transformation du module de l'impédance de transfert en un rapport de tension peut se faire au moyen d'une résistance de précision et d'un circuit différentiateur introduit dans la chaîne d'un transducteur réversible. Cette méthode permet de déterminer la sensibilité de l'hydrophone uniquement par des atténuateurs étalonnés (voir l'annexe B).

Note. — Cette méthode est applicable à l'étalonnage d'un grand nombre d'hydrophones en un temps très court. Toutefois, on doit veiller particulièrement à la précision et à la fiabilité de l'appareillage électrique compliqué.

6.4.2 Indirect measurement

A small resistor R_c , usually in the range $1\ \Omega$ to $100\ \Omega$, is connected in series with the low terminal of the projector. The projector current flowing through this resistor produces a voltage that is proportional to the projector current. This voltage is measured with a calibrated voltmeter.

When one side of the series resistor is connected to earth, either the projector or the output circuit of the power amplifier will be "above earth".

The precision of the resistor, as well as the accuracy of the voltmeter shall be better than 1%.

The impedance to ground that shunts the current measuring resistor R_c must be greater than $100 R_c$.

6.5 Measurement of transfer impedance magnitude

6.5.1 Indirect method

The magnitude of the transfer impedance of a transducer pair can be calculated as the open circuit hydrophone voltage U divided by the projector current I (see Sub-clause 3.14).

6.5.2 Differential method

If the projector current is measured indirectly with the aid of a known series resistance (see Sub-clause 6.4.2), the open circuit hydrophone voltage can be measured with the same voltmeter that is used to measure the voltage drop across that resistor. In this case, the voltmeter needs no absolute calibration. The attenuator of that voltmeter, as well as the meter scale, shall have an accuracy better than 1%.

Care must be taken to avoid changes in ground connections if the voltmeter is switched from the projector circuit to the hydrophone circuit.

6.5.3 Substitution method

If the projector current is measured by means of a known series resistance (see Sub-clause 6.4.2) and the open circuit hydrophone voltage with the insert voltage technique (see Sub-clause 6.3.2), determination of the transfer impedance magnitude is possible without a calibrated voltmeter, using the substitution method (see Appendix A).

6.5.4 Direct read-out method

The transfer impedance magnitude can be transformed to a voltage ratio by means of a precision resistor and a differentiating circuit introduced in the chain of a reversible transducer. By this method the hydrophone sensitivity is determined by reading of calibrated attenuators only (see Appendix B).

Note. — This method is convenient to calibrate many hydrophones in a short time. However, careful attention must be paid to accuracy and reliability of the complicated electrical circuit.

7. Etalonnage en champ libre par réciprocité

7.1 *Domaine d'application*

Cet article décrit le procédé d'étalonnage primaire des hydrophones dans un volume d'eau pratiquement illimité, c'est-à-dire en champ libre (voir le paragraphe 3.1), par l'application du principe de réciprocité.

7.2 *Objet*

Le but de cet article est de décrire une méthode d'étalonnage absolu d'un hydrophone étalon de laboratoire, cela avec la meilleure précision possible. Le domaine de fréquence couvert est en général limité à des fréquences comprises entre 1 kHz et 1 MHz. La précision obtenue peut être supérieure à 1 dB.

Voir [1] à [28].

7.3 *Principe général*

La méthode d'étalonnage, par l'application du principe de réciprocité en champ libre, nécessite au moins trois transducteurs dont au moins un réciproque.

Soit deux transducteurs immergés en champ libre, séparés par une distance connue d , loin des limites du volume d'eau et ayant leurs axes dirigés l'un vers l'autre.

En utilisant l'un comme projecteur et l'autre comme hydrophone, on détermine le module de leur impédance de transfert à différentes fréquences situées dans la bande de fréquences concernée (voir le paragraphe 6.5).

Avec au moins trois couples, résultant de la combinaison d'au moins trois transducteurs, on obtient au moins trois valeurs de module d'impédance de transfert indépendantes. De ces quantités, on peut déduire par le calcul les sensibilités en champ libre et la réponse à l'émission en courant de chaque transducteur pour chaque fréquence, obtenant ainsi la réponse en fréquence des transducteurs utilisés.

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

7.4 *Théorie*

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 quantités sont connus, on peut déduire les valeurs de ces quantités.

Le produit de la sensibilité en champ libre et de la réponse à l'émission en courant peut 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 de d mètres comptée depuis le centre acoustique réel de ce projecteur, existe une pression acoustique p donnée par:

$$p = \frac{S_P I_P}{d} \quad (7.1)$$

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

7. Free-field reciprocity calibration

7.1 Scope

This Clause describes the primary calibration of hydrophones in a virtually unlimited volume of water, i.e. in free field conditions (see Sub-clause 3.1) using the reciprocity principle.

7.2 Object

The object of this Clause is to specify a method of absolute calibration of laboratory standard hydrophones with the highest obtainable accuracy. The frequency range of calibration is generally restricted to frequencies between 1 kHz and 1 MHz. The obtainable accuracy can be better than 1 dB.

See [1] to [28].

7.3 General principle

The technique for calibration, using the free field reciprocity principle, requires at least three transducers of which at least one must be reciprocal.

Let two of the transducers 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 magnitude of the transfer impedance is determined at a number of frequencies throughout the frequency range of interest (see Sub-clause 6.5).

With at least three pairs, formed with at least three transducers, at least three independent transfer impedance magnitudes are obtained. From these quantities, the free field sensitivity as well as the transmitting response to current of each transducer can 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.

7.4 Theory

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 can 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 d metres distance from the real acoustic centre of the projector a sound pressure p is generated, given by:

$$p = \frac{S_P I_P}{d} \quad (7.1)$$

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

Un hydrophone H ayant une sensibilité en champ libre donnée par M_H placé dans ce champ acoustique délivre une tension en circuit ouvert U_{PH} donnée par:

$$U_{PH} = M_H p = \frac{M_H S_P I_P}{d} \quad (7.2)$$

Le module de l'impédance de transfert $|Z_{PH}|$ de ce couple de transducteurs est donné par:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = \frac{M_H S_P}{d} \quad (7.3)$$

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

Dans la troisième étape, on détermine le module de l'impédance de transfert $|Z_{TH}|$. Dans ce cas, le transducteur T est utilisé comme projecteur et H comme hydrophone.

On peut alors montrer aisément que:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = \frac{M_T S_T}{d} \quad (7.4)$$

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 le paragraphe 3.2) et que l'hydrophone reçoive une onde quasiment plane (voir aussi le paragraphe 7.5).

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 sphérique $2d/\rho f$ à la distance de référence de $d = 1$ m:

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \quad (7.5)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau et f 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 d'un transducteur sont connus, on peut en déduire les valeurs de M et S , même si chaque transducteur n'est pas utilisé de façon réversible.

Par suite, les équations (7.4) et (7.5) donnent:

$$M_T^2 = \frac{2d}{\rho f} \frac{|Z_{TP}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (7.6)$$

$$S_T^2 = \frac{d \rho f}{2} \frac{|Z_{TP}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (7.7)$$

En ce qui concerne la sensibilité de l'hydrophone M_H et la réponse du projecteur S_P , on obtient des équations analogues par permutation des indices T, P et H.

On peut démontrer que le principe de réciprocité conduit à:

$$\begin{aligned} |Z_{PH}| &= |Z_{HP}| \\ |Z_{PT}| &= |Z_{TP}| \\ |Z_{TH}| &= |Z_{HT}| \end{aligned} \quad (7.8)$$

De sorte que:

$$M_H S_P = S_H M_P \quad (7.9)$$

A hydrophone H with a free field sensitivity M_H , placed in this sound field, produces an open circuit voltage U_{PH} given by:

$$U_{PH} = M_H p = \frac{M_H S_P I_P}{d} \quad (7.2)$$

The transfer impedance magnitude $|Z_{PH}|$ of this transducer pair is given by:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = \frac{M_H S_P}{d} \quad (7.3)$$

In a second step the transfer impedance magnitude $|Z_{PT}|$ is determined after replacement of the hydrophone H by a reciprocal transducer T.

In a third step the transfer impedance magnitude $|Z_{TH}|$ is determined. In this case, the transducer T is used as a projector, and H again as hydrophone.

Now it can easily be shown that:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = \frac{M_T S_T}{d} \quad (7.4)$$

The distance between the projector and the hydrophone must be large enough so that the hydrophone is in the far field of the projector (see Sub-clause 3.2) and that the hydrophone receives a substantially plane wave (see also Sub-clause 7.5).

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 $2d/\rho f$ at the reference distance of $d = 1$ m:

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \quad (7.5)$$

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 one transducer are known, the values of M and S can be calculated, even though each transducer is not used reversibly.

Hence, from equations (7.4) and (7.5):

$$M_T^2 = \frac{2d}{\rho f} \frac{|Z_{TP}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (7.6)$$

$$S_T^2 = \frac{d \rho f}{2} \frac{|Z_{TP}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (7.7)$$

For the sensitivity of the hydrophone M_H and for the response of the projector S_P analogous equations are found by permutation of the indices T, P, and H.

It can be shown by the principle of reciprocity that:

$$\begin{aligned} |Z_{PH}| &= |Z_{HP}| \\ |Z_{PT}| &= |Z_{TP}| \\ |Z_{TH}| &= |Z_{HT}| \end{aligned} \quad (7.8)$$

So that:

$$M_H S_P = S_H M_P \quad (7.9)$$

On en déduit que:

$$\frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} = \frac{M_P S_P}{d} \quad (7.10)$$

et

$$\frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} = \frac{M_H S_H}{d}$$

Par conséquent:

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (7.11)$$

$$S_H^2 = \frac{\rho f}{2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|}$$

Notes 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 de transfert $|Z_{PH}|$ peut être déterminé deux fois, l'une par $S_P M_H$, l'autre par $S_H M_P$.

Toute différence entre ces deux valeurs, pour une même fréquence de mesure, est le signe d'un défaut de réciprocité ou de linéarité, ou peut provenir d'une erreur de mesure. La précision de la moyenne de ces deux résultats peut être supérieure à celle de chaque résultat pris séparément.

2. — Si l'étalonnage est effectué avec plus de trois transducteurs, et si deux au moins sont réciproques, la précision peut être accrue. En effet, la sensibilité peut être calculée plusieurs fois, à partir de résultats indépendants provenant de différentes associations des transducteurs. La moyenne de tous les résultats, à une même fréquence, présente une meilleure précision statistique que chaque résultat pris séparément.

7.5 Distance entre émetteur et récepteur

La distance d séparant le projecteur et l'hydrophone doit être suffisante pour que l'erreur due aux dimensions non ponctuelles des transducteurs soit rendue minimale.

A cet effet, la distance sera plus grande que la taille du plus grand des transducteurs, et l'hydrophone doit être dans le champ lointain de la source (voir le paragraphe 3.2).

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

$$d > \frac{a_1^2 + a_2^2}{\lambda} \quad (7.12)$$

et simultanément:

$$d > a_1 \text{ et } d > a_2 \quad (7.13)$$

afin que l'erreur provoquée par un défaut de répartition sphérique soit inférieure à 0,2 dB.

Voir [25] et [26].

7.6 Distance minimale entre transducteurs et surfaces limites

Avec des signaux continus, la distance comptée depuis les transducteurs jusqu'à chaque limite (surface de séparation de l'eau avec l'atmosphère, parois latérales et de fond) devra être telle que les variations de la pression acoustique directe, provoquées par les interférences dues aux réflexions sur ces surfaces limites, soient inférieures à 0,3 dB. La distance minimale qui permet de satisfaire à cet impératif dépend aussi de la directivité des transducteurs, du coefficient de réflexion des surfaces limites et du type du signal: sinusoïdal ou bruit filtré.

Avec des signaux pulsés, les interférences dues aux réflexions peuvent être éliminées si la distance minimale est telle que le retard des signaux réfléchis sur le signal direct soit supérieur à la durée de l'impulsion (voir l'annexe C).

So one can derive that:

$$\frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} = \frac{M_P S_P}{d} \quad (7.10)$$

and $\frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} = \frac{M_H S_H}{d}$

Hence:

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (7.11)$$

$$S_H^2 = \frac{d\rho f}{2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|}$$

Notes 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 transfer impedance magnitude $|Z_{PH}|$ can be determined twice, once as $S_P M_H$ and once as $S_H M_P$.

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 accuracy of the mean value may be higher than that of either value alone.

2. — If the calibration is performed with more than three transducers and if two or more are reciprocal, the accuracy may be increased 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 higher statistical accuracy than each value alone.

7.5 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 must be larger than the size of the largest transducer, and the hydrophone must be in the far field of the source (see Sub-clause 3.2).

For 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:

$$d > \frac{a_1^2 + a_2^2}{\lambda} \quad (7.12)$$

and simultaneously:

$$d > a_1 \text{ and } d > a_2 \quad (7.13)$$

in order to reduce the error due to lack of spherical divergence to below 0.2 dB.

See [25] and [26].

7.6 Minimum distance from transducers to boundary surfaces

With continuous signals, the distance from the transducers to each boundary surface (water surface, bottom and side walls) shall be such that the variation in the direct sound pressure, due to the interference with the reflections from those boundaries, be less than 0.3 dB. 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: filtered noise or sinusoidal signals.

With pulsed signals, interference with the reflections can be eliminated if the minimum distance is chosen so large that the delay of the reflected signals with respect to the direct signal is greater than the pulse length (see Appendix C).

7.7 *Forme du signal*

Le signal permettant l'étalonnage peut être soit un signal sinusoïdal, soit un bruit filtré (voir le paragraphe 6.1).

7.7.1 *Signaux sinusoïdaux*

Des conditions expérimentales telles que les interférences dues aux réflexions soient négligeables sont très rares dans le cas de signaux sinusoïdaux constamment émis. C'est pourquoi les trains de sinusoïdes sont fortement conseillés.

Afin d'obtenir des conditions de réponse du transducteur qui soient en régime permanent, la durée de l'impulsion sonore doit correspondre à un parcours supérieur à deux fois la longueur active du transducteur dans la direction de propagation, augmentée du nombre de longueurs d'onde égal au coefficient de surtension maximal des transducteurs utilisés dans la bande de fréquences de mesure (voir l'annexe C).

7.7.2 *Bruit filtré*

Un bruit filtré conforme au paragraphe 6.1 peut être utilisé.

7.8 *Limites en fréquence*

7.8.1 *Fréquence limite supérieure*

La distance minimale séparant deux transducteurs de dimensions données augmente avec la fréquence (équation (7.12)). Les signaux réfléchis par les parois sont retardés par rapport au signal direct proportionnellement aux différences de parcours. Ces différences, exprimées en longueurs d'onde, déterminent le nombre maximal de périodes du signal direct, non perturbé par les réflexions, que l'on peut détecter lorsque le signal d'essai est une impulsion. Les mesures en régime permanent nécessitent un nombre minimal de périodes dans l'impulsion mesurée (voir le paragraphe 7.7.1). De ces deux conditions résulte la limite supérieure de fréquence lors de mesures d'impulsions acoustiques avec un transducteur donné dans un certain volume d'eau.

L'amplitude des signaux réfléchis par rapport à celle du signal direct est inversement proportionnelle au rapport des parcours et dépend aussi du caractère directif du projecteur et de l'hydrophone.

Lorsque le signal est de forme sinusoïdale et continu, ou une composante de bruit, le signal direct doit être au moins supérieur de 30 dB au signal réfléchi, pour que le niveau d'interférence soit inférieur à 0,3 dB.

La fréquence limite supérieure est aussi déterminée par l'affaiblissement du signal dû à l'absorption, qui croît rapidement avec la fréquence, atteignant 0,25 dB/m au voisinage de 1 MHz, pour l'eau douce et 0,4 dB/m pour l'eau de mer.

Voir [29] et [30].

7.8.2 *Fréquence limite inférieure*

La distance minimale séparant les transducteurs de dimensions données est fonction, pour les basses fréquences, des dimensions de la partie active (équation (7.13)) de ces transducteurs.

La pression acoustique, produite par un transducteur piézo-électrique en courant constant aux fréquences inférieures à sa fréquence de résonance la plus basse, augmente proportionnellement à la fréquence.

7.7 *Signal type*

For the calibration either sinusoidal signals are used or filtered noise (see Sub-clause 6.1).

7.7.1 *Sinusoidal signals*

With continuous wave sinusoidal signals interference from reflections is almost inevitable. Conditions giving no noticeable interference are very rare. Therefore pulsed sine waves are recommended.

To obtain the response of the transducer under steady state conditions, the length of the sound pulse must be greater than twice the active length of the transducer in the direction of the acoustic path, plus a number of wavelengths equal to the highest quality factor within the measuring frequency band of the transducers being used (see Appendix C).

7.7.2 *Filtered noise*

Filtered noise, in accordance with Sub-clause 6.1, may be used.

7.8 *Frequency limitations*

7.8.1 *High-frequency limit*

The minimum separation distance for a given transducer size increases with the frequency (equation (7.12)). Boundary-reflected signals will be delayed relative to the direct signal by the differences of the lengths of the propagation paths. These differences, expressed in wavelengths, determine the maximum number of cycles of interference-free signal that can be measured when the test signal is pulsed. Steady state measurements require a minimum number of cycles in the measured pulse (see Sub-clause 7.7.1). These two conditions specify the upper frequency limit for pulsed sound measurements with this transducer in a given volume of water.

The relative amplitude of the boundary reflected signals to the direct signal is inversely proportional to the ratio of the path lengths and also depends upon the directional response of the projector and the hydrophone.

If the signal is a continuous sinusoidal wave or a band of noise, the direct signal should be at least 30 dB above the boundary reflected signal, for the interference level to be less than 0.3 dB.

The upper frequency limit is also determined by the attenuation of the sound due to absorption, increasing rapidly with the frequency, reaching 0.25 dB/m at about 1 MHz for fresh water and 0.4 dB/m for sea water.

See [29] and [30].

7.8.2 *Low frequency limit*

The minimum separation distance for a given transducer size at low frequencies is determined by the active dimensions of the transducer (equation (7.13)).

The sound pressure output at constant current of a piezoelectric transducer at frequencies below its lowest resonance frequency is proportional to the frequency.

La pression acoustique produite par un transducteur électrodynamique en courant constant est relativement constante pour les fréquences entre la première et la deuxième fréquence de résonance, et décroît proportionnellement au carré de la fréquence en dessous de la première fréquence de résonance.

Il en résulte qu'avec ces deux types de transducteurs, en dessous d'une certaine fréquence, le niveau de pression acoustique sur l'hydrophone devient inférieur au niveau de bruit ambiant. Ces phénomènes imposent une limite inférieure à la bande de fréquences utile lors d'un étalonnage effectué avec la précision requise.

Lors de mesures par impulsions, le nombre de périodes dans une même impulsion doit être au moins de deux en plus des impératifs définis au paragraphe 7.7.1. Par suite, lorsque la fréquence décroît, la durée de l'impulsion augmente jusqu'à ce que, aux basses fréquences, les signaux directs et réfléchis se confondent.

Par suite des dimensions limitées des installations d'essai (en général, la profondeur d'eau est comprise entre 6 m et 20 m), une limite inférieure expérimentale sera atteinte aux environs de 1 kHz.

7.9 Mesures

7.9.1 Généralités

L'étalonnage sera effectué selon les principes donnés aux articles 5 et 6.

Voir [10] à [28].

7.9.2 Tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert de l'hydrophone sera mesurée soit à l'extrémité du câble de l'hydrophone, soit à l'entrée du préamplificateur en utilisant alors la méthode de la tension insérée (voir le paragraphe 6.3.2). Les bornes choisies devront être précisées (voir le paragraphe 6.3).

7.9.3 Courant de projecteur

Le courant circulant dans le projecteur peut être obtenu soit par un ampèremètre de précision à thermocouple, soit par la mesure de la chute de tension se produisant à travers une petite résistance connue, en série avec le projecteur. Le voltmètre utilisé dans ce dernier cas doit être le même que celui utilisé lors des mesures de tension en circuit ouvert (voir le paragraphe 6.4).

7.9.4 Module de l'impédance de transfert

Le module de l'impédance de transfert sera soit calculé à partir des valeurs relevées de la tension de sortie de l'hydrophone et du courant du projecteur, soit mesuré directement par la méthode de substitution ou en lecture directe (voir le paragraphe 6.5).

7.9.5 Vérification des conditions de champ libre

On vérifie les conditions de champ libre en étudiant la variation du module des impédances de transfert en fonction de la distance séparant le projecteur de l'hydrophone. Le produit du module de l'impédance de transfert par la distance devrait être constant à 10% près (voir la note 2 du paragraphe 3.14).

Note. — Au cas où ce produit n'est pas constant, mais est une fonction monotone de la distance, il peut s'agir d'une erreur d'estimation de la position des centres acoustiques des transducteurs. Dans ce cas, on peut représenter graphiquement la variation de l'inverse de la tension en circuit ouvert de l'hydrophone U en fonction de la distance présumée (voir la figure 3, page 40).

Une droite passant par les points de mesure coupe l'axe des abscisses en un point O' qui est la nouvelle origine du décompte des distances réelles.

The sound pressure output at constant current of an electrodynamic transducer is relatively constant at frequencies between the first and second resonances and decreases proportionally to the square of the frequency below the first resonance frequency.

Hence, with both types of transducers the sound pressure level at the hydrophone will fall below the ambient noise level when the frequency is lowered below a certain value. This condition sets a lower limit to the frequency range for a calibration with the desired accuracy.

In addition to the requirements given in Sub-clause 7.7.1, for pulsed sound measurements, the number of cycles in one pulse must be at least two. Hence, as the frequency is lowered the pulse length increases until at a low frequency the direct and the reflected signals merge.

Due to the limited size of the calibration facility (for most facilities the water is between 6 m and 20 m deep), a practical low frequency limit will be about 1 kHz.

7.9 Measurements

7.9.1 General

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

See [10] to [28].

7.9.2 Open circuit voltage

The open circuit voltage of the hydrophone shall be measured either at the end of the hydrophone cable, or, using the insert voltage technique (see Sub-clause 6.3.2), at the input of the pre-amplifier, if present. The selected terminals shall be specified (see Sub-clause 6.3).

7.9.3 Projector current

The current through the projector is determined either by a precision thermocouple ammeter or by measuring the voltage drop occurring across a known small resistor in series with the projector. The voltmeter used in this case shall be the same voltmeter as that used for the measurement of the open circuit voltage (see Sub-clause 6.4).

7.9.4 Transfer impedance magnitude

The magnitude of the transfer impedance shall either be calculated from the measured values of the hydrophone voltage and the projector current, or must be measured directly, either with the substitution method or with the direct read-out method (see Sub-clause 6.5).

7.9.5 Free field verification

Free field conditions are verified by comparison of the magnitudes of the transfer impedances when the distance between the projector and the hydrophone is changed. The product of the transfer impedance magnitude and the distance should be constant within 10% (see Note 2 of Sub-clause 3.14).

Note. — When the product of the transfer impedance magnitude and the distance is not constant but is a smoothly varying function of the distance, this can be due to an error in the estimation of the position of the acoustic centres of the transducers. In such a case, a plot should be made of the reciprocal value of the open circuit hydrophone voltage U versus the assumed distance (see Figure 3, page 41).

A straight line through the measured points intersects the abscissa at the point O' which is the new origin from which the real distances are deduced.

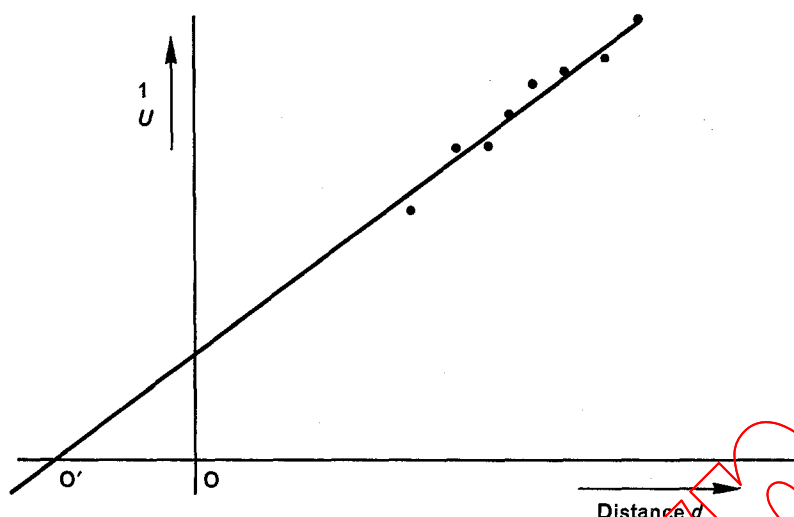


FIGURE 3

7.9.6 Vérification de la réciprocité

La réciprocité de chaque paire de transducteurs réversibles doit être vérifiée en comparant les valeurs des modules d'impédance de transfert lorsque les fonctions de projecteur et d'hydrophone sont interverties sans modifications de position des transducteurs. La différence entre les deux valeurs obtenues ne doit pas être supérieure à 10%.

Si la différence est supérieure, l'un au moins des transducteurs n'est pas réciproque. La comparaison par vérifications de réciprocité des deux transducteurs avec un troisième transducteur réversible révèle lequel n'est pas réciproque.

Dans le cas du transducteur non réciproque, on ne doit faire usage que des modules de l'impédance de transfert pour les calculs de sensibilité correspondant à l'utilisation du transducteur, soit en projecteur, soit en hydrophone.

Note. — Si les transducteurs sont de constitution identique, ils peuvent être linéaires ou non linéaires de la même façon, et sembler alors réciproques d'après l'un des essais ci-dessus. On effectue donc des essais en utilisant différents types de second transducteur avant que le premier puisse être considéré comme réciproque.

7.9.7 Vérification de la linéarité

La linéarité de chaque couple de transducteurs doit être vérifiée par la comparaison des valeurs d'impédance de transfert relevées 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, la variation de l'impédance de transfert ne doit pas dépasser 10%.

Note. — Pendant les opérations d'étalonnage proprement dit, on s'assure 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.

7.9.8 Sensibilité en champ libre

D'après les équations (7.6) et (7.11) du paragraphe 7.4, on peut déduire des modules des impédances de transfert, mesurées à chaque fréquence, la sensibilité en champ libre M de chaque transducteur.

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

Si, par suite de mesures répétées ou à la suite de l'utilisation de plus de trois transducteurs, on détermine plusieurs fois la sensibilité pour une fréquence donnée, la valeur moyenne peut être prise

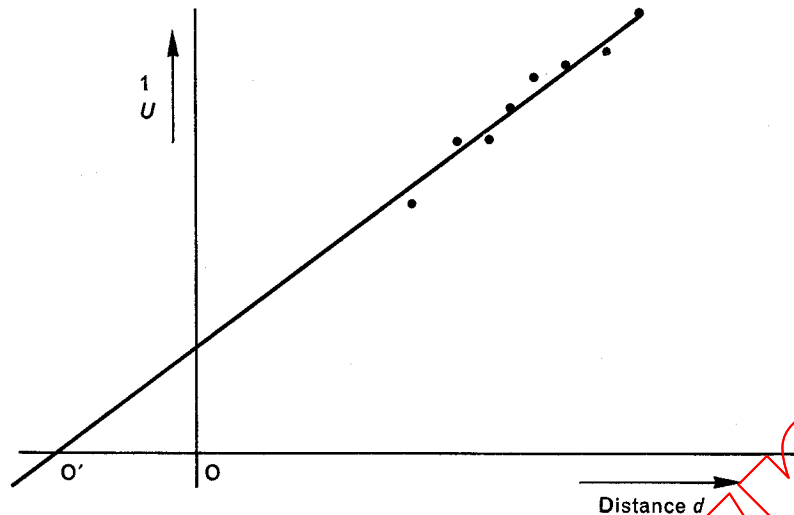


FIGURE 3

7.9.6 Reciprocity verification

The reciprocity of each pair of reversible transducers shall be verified by comparison of the transfer impedance magnitudes when the functions of projector and hydrophone are interchanged without changing the position of the transducers. These two values should not differ by more than 10%.

If the difference is larger, at least one of the two transducers is not reciprocal. Comparison by reciprocity verifications of both transducers with a third reversible transducer reveals which one is the non-reciprocal transducer.

In the case of the non-reciprocal transducer, only those transfer impedance magnitudes are used for the calculation of the sensitivities, for which the transducer is used either as a projector or as a hydrophone.

Note. — If the transducers are identical in construction they can be linear or non-linear to the same extent and yet seem reciprocal by one of the tests outlined above. Therefore these tests are performed using several types for the second transducer before the first transducer can be presumed to be reciprocal.

7.9.7 Linearity verification

The linearity of each pair of transducers shall be verified by comparison of the magnitudes of the 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 about 20 dB higher than the background noise level up to the highest level that will be used, the magnitude of the transfer impedance should remain constant within 10%.

Note. — Care is 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.

7.9.8 Free field sensitivity

By means of equations (7.6) and (7.11) of Sub-clause 7.4, the free field sensitivity M of each transducer can be calculated from the transfer impedance magnitudes measured at each frequency.

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

If, as a result of repeated measurements or by the use of more than three transducers, the sensitivity is determined more than once at the same frequency, a mean value may be considered as the final

comme résultat final. Une différence de plus de 10% entre ces valeurs (ou de plus de 1 dB entre les niveaux) peut être due à des erreurs provenant d'interférences, de défaillances de l'appareillage ou d'erreurs de calcul. En règle générale, les valeurs largement dispersées sont facilement isolées du résultat final.

7.9.9 Réponse à l'émission en courant

En utilisant les équations (7.7) et (7.11) du paragraphe 7.4, la réponse à l'émission en courant S de chaque transducteur peut être calculée. Le calcul de cette grandeur n'a de signification que dans le cas d'un transducteur réellement utilisé comme émetteur acoustique étalonné.

7.9.10 Niveau de sensibilité en champ libre et réponse à l'émission en courant

Voir les définitions aux paragraphes 3.9.1 et 3.11.1.

On porte les niveaux de sensibilité en champ libre et de réponse à l'émission en courant sur un graphique à échelles semi-logarithmiques, le logarithme de la fréquence étant en abscisse. La longueur préférentielle d'une décade sera de 50 mm ou 100 mm. Les niveaux sont portés en ordonnée de façon que 10 dB, 25 dB ou 50 dB correspondent à une décade en abscisse, selon la Publication 263 de la CEI. On spécifie l'orientation du transducteur et le niveau de référence. S'il y a plusieurs façons de réaliser le branchement électrique, on devra également le spécifier.

7.9.11 Précision

Dans la mesure où les conditions de linéarité, réciprocité et de champ libre correspondent aux définitions des paragraphes 7.9.5, 7.9.6 et 7.9.7, l'exactitude de l'étalonnage sera meilleure que 10% ou 1 dB.

Voir [12].

8. Etalonnage en champ libre par comparaison

8.1 Domaine d'application

Cet article décrit l'étalonnage d'hydrophones, effectué dans une étendue d'eau pratiquement sans bornes, c'est-à-dire en champ libre (voir le paragraphe 3.1), en comparant l'appareil avec un hydrophone étalon ou en utilisant un projecteur étalonné.

8.2 Objet

Spécifier une méthode d'étalonnage d'hydrophones utilisant un transducteur étalonné dans la bande de fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz.

La précision qu'il est possible d'atteindre peut être meilleure que 3 dB.

Voir [12].

8.3 Principe

L'étalonnage d'un hydrophone par comparaison nécessite soit un hydrophone étalonné et un projecteur auxiliaire, soit un projecteur étalonné.

result. A difference of more than 10% between these values (or more than 1 dB between the levels) may be caused by errors resulting from interference, equipment failure or calculation errors. Generally the widely deviating values are easily isolated from the final results.

7.9.9 *Transmitting response to current*

By means of equations (7.7) and (7.11) of Sub-clause 7.4, the transmitting responses to current S of each transducer can be calculated. This calculation makes sense only for a transducer that is actually to be used as a calibrated sound source.

7.9.10 *Levels of free field sensitivity and of transmitting response to current*

See definitions in Sub-clauses 3.9.1 and 3.11.1.

The levels of free field sensitivity and of the transmitting response to current are plotted on semi-logarithmic paper with the logarithm of the frequency as the abscissa. The length of one decade shall preferably be either 50 mm or 100 mm. The levels are plotted as the ordinate axis with a scale factor of either 10 dB, 25 dB or 50 dB equal to the length of one decade along the abscissa, according to IEC Publication 263. The orientation of the transducer, as well as the reference level, is specified. If more than one means of electrical connection exists, this too is specified.

7.9.11 *Accuracy*

Provided that linearity, reciprocity and free field conditions are satisfied as specified in Sub-clauses 7.9.5, 7.9.6 and 7.9.7, the accuracy of the calibration will be better than 10% or 1 dB.

See [12].

8. **Free-field calibration by comparison**

8.1 *Scope*

This clause describes the calibration of hydrophones in a virtually unbounded body of water, i.e. in free field conditions (see Sub-clause 3.1) by comparison with a standard hydrophone or by using a calibrated projector.

8.2 *Object*

To specify a method for the calibration of hydrophones, using a calibrated transducer in the frequency range from 100 Hz to 1 MHz.

The obtainable accuracy can be better than 3 dB.

See [12].

8.3 *Principle*

Calibration of a hydrophone by comparison requires either a calibrated hydrophone and an auxiliary projector, or a calibrated projector.

8.3.1 *Un projecteur auxiliaire non étalonné*

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 par l'hydrophone inconnu. Le rapport des tensions en circuit ouvert des deux hydrophones est égal au rapport de leurs sensibilités en champ libre.

8.3.2 *Un projecteur étalonné*

La pression acoustique, produite par un projecteur étalonné en un point dans le champ acoustique, est connue en mesurant le courant circulant dans le projecteur et la distance lors de l'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.

8.4 *Comparaison avec un hydrophone étalon*

8.4.1 *Distance émetteur-récepteur*

La distance d séparant le projecteur de l'hydrophone doit être choisie d'après les instructions données au paragraphe 7.5.

Une distance inférieure à celle qui est requise pour satisfaire les 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.

Voir [25].

8.4.2 *Profondeur d'immersion du transducteur*

Afin d'éviter les fluctuations du champ acoustique provoquées par des réflexions de surface, on choisit la profondeur d'immersion selon les directives relatives aux étalonnages par réciprocité (voir le paragraphe 7.6).

8.4.3 *Forme du signal*

La forme du signal doit être la même que celle qui est décrite pour l'étalonnage par réciprocité (voir le paragraphe 7.7).

8.4.4 *Mesures*

On effectue l'étalonnage dans les conditions définies à l'article 5.

On mesure la tension en circuit ouvert de l'hydrophone inconnu placé dans le champ acoustique, soit à l'extrémité du câble, soit en utilisant la méthode de la tension insérée, à l'entrée du préamplificateur (voir le paragraphe 6.3).

On mesure la tension en circuit ouvert de l'hydrophone étalon selon les directives accompagnant la courbe d'étalonnage de cet hydrophone.

Note. — Cette mesure peut être effectuée dans l'eau ou dans l'air.

Dans ce dernier cas, la mesure doit être exécutée dans une chambre anéchoïde, utilisée généralement pour la calibration des microphones. Dans ce cas, l'hydrophone étalon peut être remplacé par un microphone étalonné.

Voir la Publication 486 de la CEI: Méthode de précision pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons à condensateur d'un pouce par la technique de la réciprocité, et [22].

8.3.1 *With an uncalibrated auxiliary projector*

The sound pressure at a point in the sound field, generated by the auxiliary projector, is measured with a calibrated hydrophone. Then the 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.

8.3.2 *With a calibrated projector*

The sound pressure at a point in the sound field, generated by a calibrated projector, is known by measuring the current through the projector 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.

8.4 *Comparison with a standard hydrophone*

8.4.1 *Separation distance*

The distance d between the projector and the hydrophone shall be chosen according to the instructions given in Sub-clause 7.5.

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.

See [25].

8.4.2 *Transducer depth*

To avoid strong fluctuations introduced in the sound field by reflections from the water surface, the depth of the transducers is chosen according to the instructions given for reciprocity calibrations (see Sub-clause 7.6).

8.4.3 *Signal type*

The signal type shall be the same as described for the reciprocity calibration (see Sub-clause 7.7).

8.4.4 *Measurements*

The calibration is performed under the conditions specified in Clause 5.

The open circuit voltage of the unknown hydrophone in the sound field is measured, either at the end of the cable, or, using the insert voltage technique, at the input of the preamplifier (see Sub-clause 6.3).

The open circuit voltage at the calibrated standard hydrophone terminals are measured as specified with the calibration curve of that hydrophone.

Note. — This measurement can be performed in water or in air.

In the latter case the measurement shall be carried out in an anechoic room as is generally used for the calibration of microphones. In that case the standard hydrophone may be replaced by a calibrated microphone.

See IEC Publication 486, Precision Method for Free-field Calibration of One-inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique, and [22].

8.4.5 Sensibilité en champ libre

Le rapport des tensions en circuit ouvert des deux hydrophones est égal au rapport de leurs sensibilités. Connaissant la sensibilité de l'hydrophone étalon, on en déduit celle de l'hydrophone essai.

8.4.6 Précision

La précision de chaque mesure de tension doit être meilleure que 10%, ou encore, la précision de chaque mesure de niveau doit être meilleure que 1 dB. Le niveau de sensibilité de l'hydrophone étalon doit être connu avec une incertitude inférieure à 1 dB. Tenant compte de toutes les erreurs possibles, l'erreur dans l'étalonnage de l'hydrophone en essai sera inférieure à 3 dB.

8.5 Etalonnage à l'aide d'un projecteur étalonné

8.5.1 Distance émetteur-récepteur

On choisit l'intervalle séparant le projecteur de l'hydrophone selon les recommandations du paragraphe 8.4.1.

Note. — Le projecteur a été étalonné pour une certaine distance ou dans une certaine gamme de distances. Afin de réduire les erreurs dues à la répartition non sphérique de l'émission ainsi qu'à la diffraction, la distance séparant le projecteur de l'hydrophone doit être proche de la valeur 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 (7.12) et (7.13) soient remplies.

8.5.2 Profondeur d'immersion du transducteur

On choisit la profondeur d'immersion du transducteur selon les spécifications relatives à l'étalonnage par réciprocité (voir l'article 7).

8.5.3 Forme du signal

Les recommandations relatives à la forme du signal, définies au paragraphe 7.7, sont applicables.

Note. — Si le projecteur a été calibré avec un signal de forme donnée, il est préférable d'utiliser ce même signal lorsque ce projecteur constitue une source sonore étalonnée.

8.5.4 Mesures

On effectue l'étalonnage selon les directives de l'article 5. La mesure de la tension en circuit ouvert U_{PH} est décrite dans le paragraphe 7.9.2. La mesure du courant I_P du projecteur est décrite dans le paragraphe 7.9.3. Le module de l'impédance de transfert $|Z_{PH}|$ est déterminé selon les indications du paragraphe 7.9.4.

On effectue la vérification du champ libre selon les dispositions du paragraphe 7.9.5, et la vérification de la linéarité selon les dispositions du paragraphe 7.9.7.

A partir des valeurs mesurées de U_{PH} , I_P et $|Z_{PH}|$ et de la réponse à l'émission en courant S_P du projecteur qui est connue, la sensibilité en champ libre M_H de l'hydrophone peut être calculée d'après l'équation suivante, déduite des équations (7.2) et (7.3):

$$M_H = \frac{d U_{PH}}{S_P I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{S_P} \quad (8)$$

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

8.4.5 Free field sensitivity

The ratio of the open circuit voltages of both hydrophones is equal to the ratio of their sensitivities. Because the sensitivity of the standard hydrophone is known, the sensitivity of the hydrophone under test can be calculated.

8.4.6 Accuracy

The accuracy of each voltage measurement shall be better than 10%, or the accuracy of each level measurement shall be better than 1 dB. The sensitivity level of the standard hydrophone must be known with an uncertainty less than 1 dB. When all possible errors are added together, the error in the sensitivity of the hydrophone under test will be less than 3 dB.

8.5 Calibration with a calibrated projector

8.5.1 Separation distance

The distance between the projector and the hydrophone is chosen according to the recommendations given in Sub-clause 8.4.1.

Note. — The projector has been calibrated at a certain distance or within a given range of distances. 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 (7.12) and (7.13) to be fulfilled.

8.5.2 Transducer depth

The depth of the transducers is chosen according to the specifications for reciprocity calibration (see Clause 7).

8.5.3 Signal type

For the signal type the recommendations described in Sub-clause 7.7 are applicable.

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.

8.5.4 Measurements

The calibration is performed under the conditions given in Clause 5. Measurement of the open circuit voltage U_{PH} is described in Sub-clause 7.9.2. Measurement of the projector current I_P is described in Sub-clause 7.9.3. The transfer impedance magnitude $|Z_{PH}|$ is obtained according to Sub-clause 7.9.4.

The free-field verification shall be performed in accordance with Sub-clause 7.9.5, and the linearity verification according to Sub-clause 7.9.7.

With the measured values of U_{PH} , I_P and $|Z_{PH}|$ and with the known transmitting response to current S_P of the projector, the free field sensitivity M_H of the hydrophone can be calculated with the following equation, derived from the equations (7.2) and (7.3).

$$M_H = \frac{d U_{PH}}{S_P I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{S_P} \quad (8)$$

Note. — The terminals of the hydrophone to which the calibration refers should be specified with the result.

8.5.5 Précision

Lorsque les conditions de linéarité et de champ libre sont satisfaites à 1 dB près, et si la précision de l'étalonnage est elle aussi supérieure à 1 dB, la précision du résultat final peut être supérieure à 2 dB.

9. Compensation dans une chambre fermée

9.1 Domaine d'application

Cette méthode permet d'étalonner un hydrophone sans disposer d'un étalon, en utilisant une chambre fermée et remplie d'eau, à des fréquences telles que la longueur d'onde du signal soit suffisamment supérieure à la plus grande dimension de la chambre.

9.2 Objet

Spécifier la méthode d'étalonnage d'un hydrophone dans une petite chambre fermée, sans utiliser de transducteur étalon.

9.3 Introduction

Cette méthode est utilisée lorsqu'on doit étalonner des hydrophones sans disposer d'un très grand volume d'eau.

Selon le type de transducteur d'étalonnage, on peut apporter deux variations à la méthode:

- 1) Méthode de compensation électrodynamique dans laquelle on utilise un transducteur d'équilibre de type électrodynamique (voir le paragraphe 9.4).
- 2) Méthode de compensation piézo-électrique, dans laquelle on utilise un transducteur d'équilibre de type piézo-électrique (voir le paragraphe 9.5).

Voir [44] à [50].

9.4 Etalonnage selon la compensation électrodynamique

La valeur de la sensibilité en pression d'un transducteur électro-acoustique peut être déterminée par des mesures mettant en œuvre une cuve fermée remplie d'eau dans l'intervalle de fréquences allant de 0,1 Hz à 1 kHz (voir la figure 4, page 50).

La cuve contient trois transducteurs: un projecteur source, un projecteur d'équilibre électrodynamique et l'hydrophone inconnu à étalonner. Le projecteur source produit dans la cuve une pression alternative dont la valeur est mesurée près de l'hydrophone par le projecteur d'équilibre.

La sensibilité en pression de l'hydrophone est le rapport de la tension en circuit ouvert U à la pression acoustique p . Le projecteur d'équilibre et le projecteur source sont alimentés par le même générateur de signaux, mais la phase et l'amplitude du projecteur d'équilibre sont ajustées jusqu'à ce que le mouvement de son diaphragme soit égal à zéro. A cet effet, le projecteur d'équilibre est équipé d'un détecteur de déplacement. L'hydrophone à étalonner est placé près du diaphragme du projecteur d'équilibre, à une distance faible par rapport aux dimensions de la chambre. Lorsque

8.5.5 Accuracy

Provided that linearity and free-field conditions are satisfied within 1 dB and that the projector has been calibrated with an accuracy also better than 1 dB, the accuracy of the final result may be better than 2 dB.

9. Compensation in a closed chamber

9.1 Scope

This method allows a hydrophone to be calibrated without a standard in a closed water-filled chamber at frequencies at which the wavelength is sufficiently larger than the largest dimension of the chamber.

9.2 Object

To specify the method of calibration of a hydrophone in a small closed chamber, without a standard transducer.

9.3 Introduction

The chamber method serves when hydrophones have to be calibrated without the availability of a large water volume.

Depending on the type of calibration transducer, there are two variations of this method:

- 1) An electrodynamic compensation method, in which an electrodynamic null transducer is used (see Sub-clause 9.4).
- 2) A piezoelectric compensation method, in which a piezoelectric null transducer is used (see Sub-clause 9.5).

See [44] to [50].

9.4 Calibration by electrodynamic compensation

The magnitude of the pressure sensitivity of an electroacoustic transducer may be determined by calibration inside a closed, waterfilled tank, in the frequency range from 0.1 Hz to 1 kHz (see Figure 4, page 51).

The tank contains three transducers: a source projector, an electrodynamic null projector and the unknown hydrophone to be calibrated. The source projector produces an alternating pressure in the tank, the magnitude of which is measured near the hydrophone by the null projector.

The pressure sensitivity of the hydrophone is the ratio of the open circuit output voltage U to the sound pressure p . Null projector and source projector are driven by the same signal generator, but the phase and the amplitude of the null projector are adjusted until the movement of its diaphragm is zero. For this purpose the null projector is equipped with a displacement detector. The hydrophone being calibrated is located close to the diaphragm of the null projector at a distance small compared

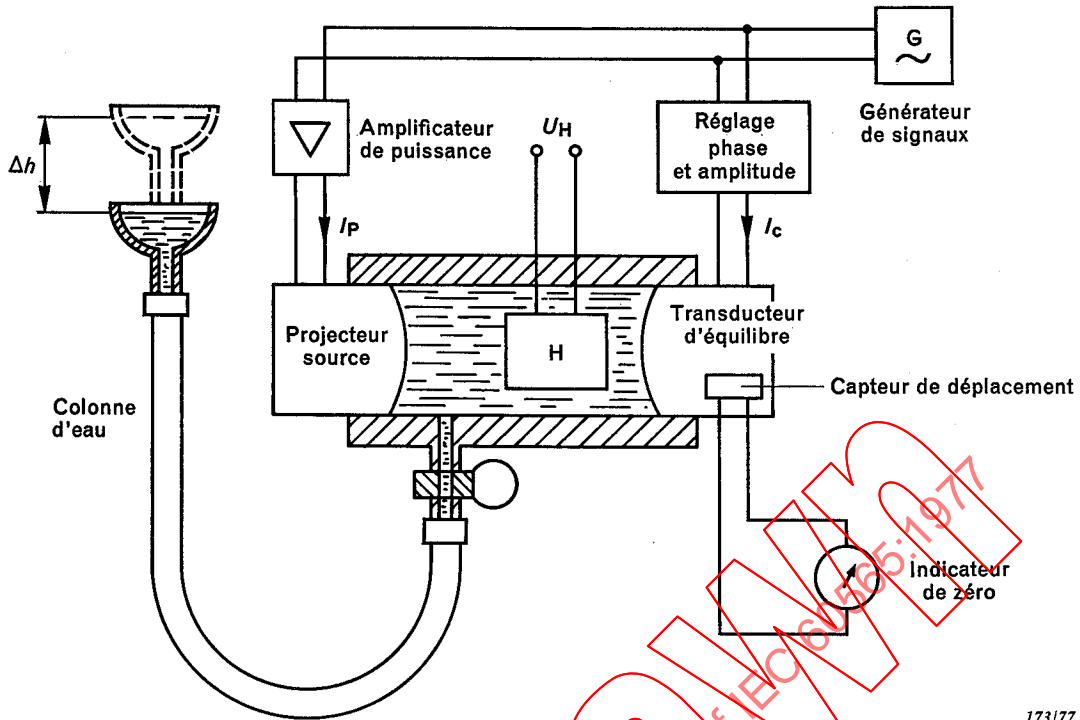


FIG. 4. — Schéma du système de mesure.

173/77

le déplacement du projecteur d'équilibre est égal à zéro, par suite de la combinaison des forces de contre-réaction de la pression acoustique et du courant d'alimentation, la pression acoustique près du diaphragme est égale à :

$$p = \frac{Bl}{A} I_c \quad (9.1)$$

où :

$\frac{Bl}{A}$ est la constante caractéristique du projecteur d'équilibre

B est la densité de flux du champ de polarisation de la bobine du transducteur

l est la longueur du conducteur dans le champ B

A est la surface sensible réelle du transducteur

I_c est le courant de compensation

Le coefficient $\frac{Bl}{A} = \frac{p}{I_c}$ est en général indépendant de la fréquence, et peut être mesuré de façon statique, lorsque la cuve est ouverte, en modifiant le niveau de l'eau au-dessus du projecteur d'équilibre d'une quantité Δh , et en ajustant le déplacement statique x_0 au niveau du transducteur d'équilibre au moyen d'un changement du courant continu ΔI_c le traversant.

Dans ces conditions, pour $x_0 = 0$, à fréquence nulle :

$$p = \rho g \Delta h$$

$$\frac{Bl}{A} = \frac{\Delta p}{\Delta I_c} = \frac{\rho g \Delta h}{\Delta I_c} \quad (9.2)$$

où :

Δp est la variation de pression hydrostatique, due à la variation Δh du niveau libre de l'eau

ρ est la masse volumique de l'eau

g est l'accélération de la pesanteur

Δh est la variation connue de la hauteur de colonne d'eau

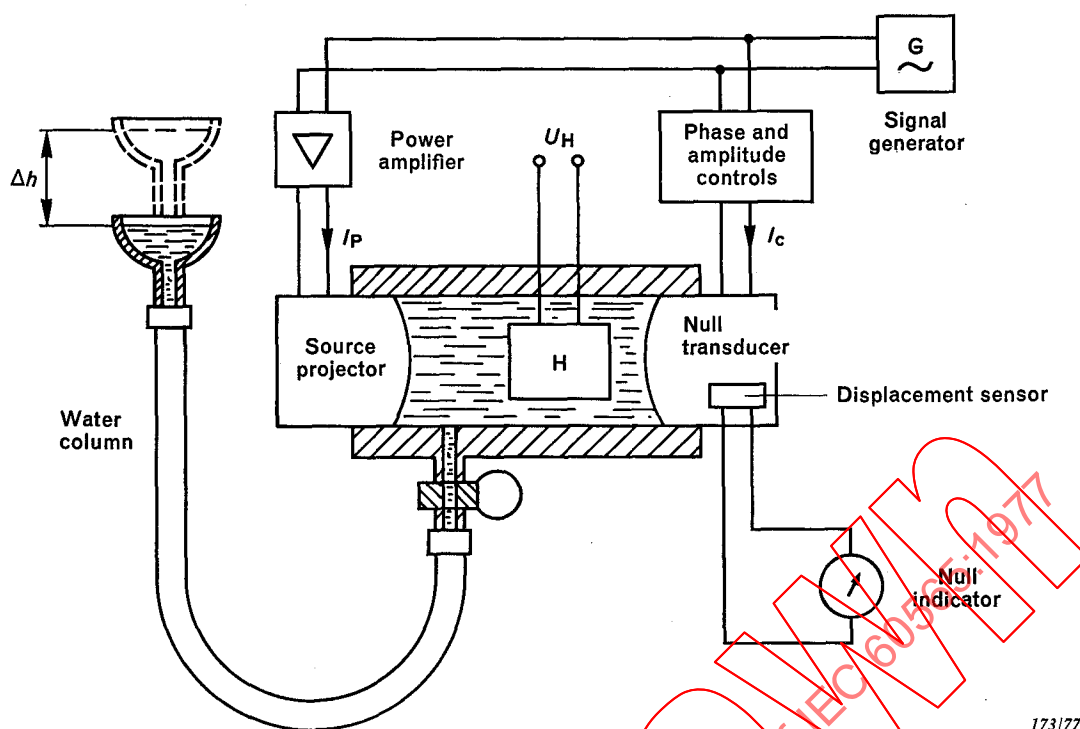


FIG. 4. — Schematic drawing of the measuring system.

with the dimensions of the chamber. When the displacement of the null projector is zero, as a result of the counteracting forces of sound pressure and driving current, the sound pressure close to the diaphragm is equal to:

$$p = \frac{B l}{A} I_c \quad (9.1)$$

where:

$\frac{B l}{A}$ is a characteristic constant of the null transducer

B is the flux density of the polarizing field in the transducer coil

l is the length of conductor in field B

A is the effective sensitive area of the transducer

I_c is the compensation current

The factor $\frac{B l}{A} = \frac{p}{I_c}$ is generally independent of the frequency, and can be measured statically when the tank is open, by changing the water level over the null projector by an amount Δh , and balancing the static displacement x_0 at the null transducer with a variation of the direct current ΔI_c through it.

For $x_0 = 0$, at zero frequency:

$$p = \rho g \Delta h$$

$$\frac{B l}{A} = \frac{\Delta p}{\Delta I_c} = \frac{\rho g \Delta h}{\Delta I_c} \quad (9.2)$$

where:

Δp is the change in hydrostatic pressure due to the change Δh of the free water level

ρ is the density of the water

g is the acceleration of gravity

Δh is the known change of the water column height

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

$$M_{pH} = \frac{U}{p} = \frac{U}{I_c} \frac{\Delta I_c}{\rho g \Delta h} \quad (9.3)$$

Notes 1. — La tension U de l'hydrophone peut être mesurée soit directement, soit au moyen de la méthode de la tension insérée (voir le paragraphe 6.3).

2. — La sensibilité mesurée dans une chambre fermée est la sensibilité en pression de l'hydrophone (voir le paragraphe 3.10). Sa valeur est égale à la sensibilité en champ libre si l'hydrophone est petit par rapport à la longueur d'onde du son dans l'eau et si la complaisance de l'hydrophone n'est pas supérieure à celle du même volume d'eau. Dans ces conditions, la constante de diffraction de l'hydrophone est égale à l'unité.

3. — La constante de diffraction d'un transducteur est égale au rapport de la pression moyenne sur le diaphragme lorsque celui-ci est bloqué, à la pression acoustique en champ libre à l'endroit occupé par l'hydrophone, celui-ci étant enlevé.

9.5 Etalonnage selon la compensation piézo-électrique

Le principe de base de cette technique d'étalonnage est le même que celui de la méthode de compensation électrodynamique (voir le paragraphe 9.4). Pendant son étalonnage, l'hydrophone est placé dans une cuve fermée et remplie d'eau, équipée d'un projecteur source et d'un transducteur d'équilibre piézo-électrique (voir la figure 5).

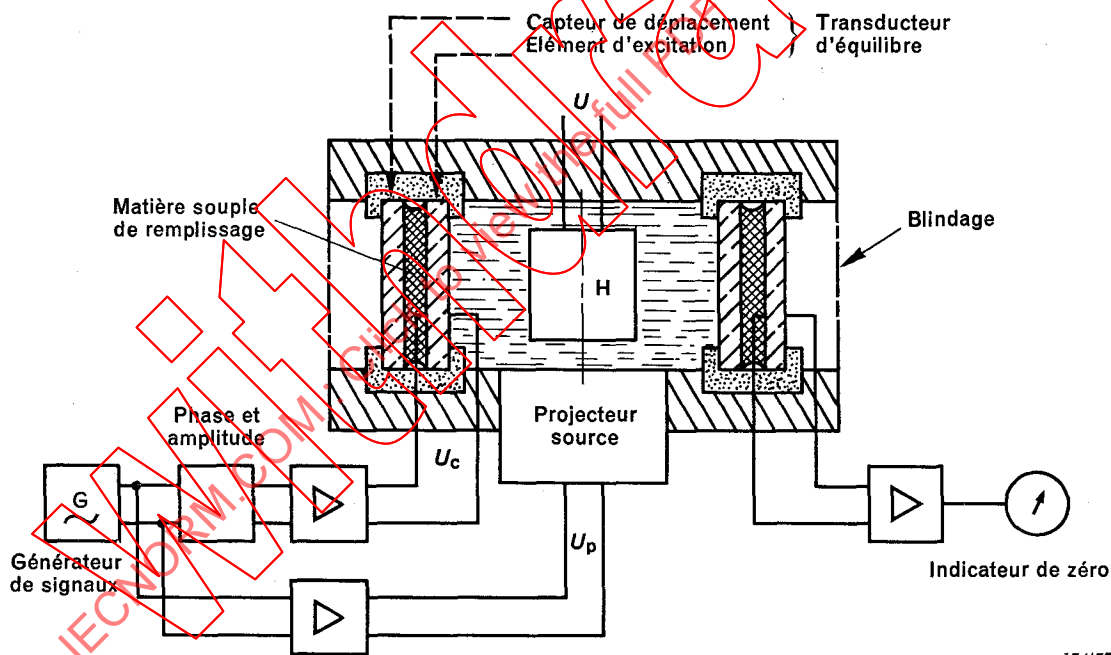


FIG. 5. — Schéma de la chambre pour hautes fréquences.

Cette méthode permet l'étalonnage de l'hydrophone à des fréquences comprises entre 1 Hz et 5 kHz.

Le transducteur d'équilibre se compose de deux tubes cylindriques coaxiaux en céramique piézo-électrique. Le petit espace annulaire entre les tubes est rempli d'une matière de couplage élastique. Le tube intérieur est le transducteur excitateur, le tube extérieur est le capteur de déplacement. La phase et l'amplitude de la tension U_c aux bornes de l'élément d'excitation du transducteur

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

$$M_{pH} = \frac{U}{p} = \frac{U}{I_c} \frac{\Delta I_c}{\rho g \Delta h} \quad (9.3)$$

Notes 1. — The hydrophone voltage U can be measured either directly or by means of the insert voltage technique (see Sub-clause 6.3).

2. — The sensitivity measured in a closed chamber is the pressure sensitivity of the hydrophone (see Sub-clause 3.10). Its value is equal to the free field sensitivity if the hydrophone is small compared to the wavelength of the sound in water, and if the compliance of the hydrophone is not greater than the compliance of the same volume of water. Under these conditions, the diffraction constant of the hydrophone is unity.

3. — The diffraction constant of a transducer is equal to the ratio of the average pressure over the diaphragm when this is blocked, to the free field sound pressure at the location of the hydrophone when it is absent.

9.5 Calibration by piezoelectric compensation

The basic principle of this calibration technique is the same as for the electrodynamic compensation method (see Sub-clause 9.4). While being calibrated, the hydrophone is placed inside a closed, water-filled tank, equipped with a source projector and a piezoelectric null transducer (see Figure 5).

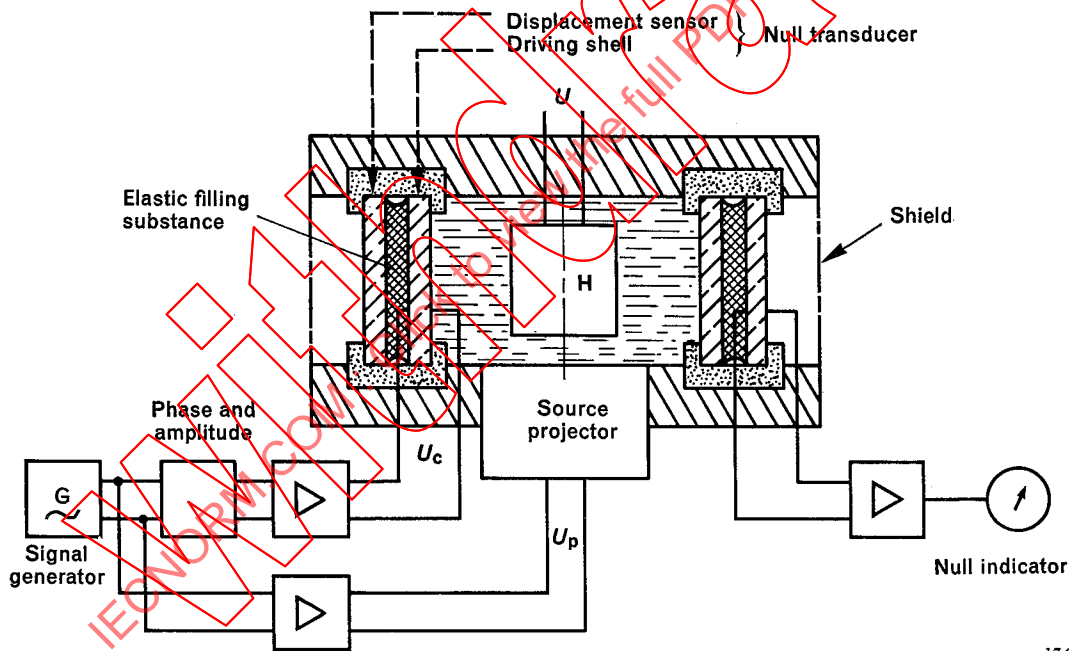


FIG. 5. — Diagram of the chamber for high-frequency.

With this method the hydrophone can be calibrated at frequencies between 1 Hz and 5 kHz.

The null transducer consists of two coaxially mounted piezoelectric ceramic cylindrical shells. The small annular gap between the shells is filled with an elastic coupling substance. The inner shell acts as driving transducer, while the outer shell serves as displacement sensor. Phase and amplitude of the voltage U_c at the terminals of the driving shell of the null transducer are adjusted

d'équilibre sont réglées par rapport à la tension alimentant le projecteur source de façon que la tension de sortie du tube extérieur soit égale à zéro. Le projecteur source et le tube excitateur sont alimentés par le même générateur de signaux.

L'hydrophone à étalonner est placé près du centre du transducteur d'équilibre. Des dispositions spéciales pour les fréquences supérieures à 1 kHz sont données au paragraphe 9.9.

Lorsque les influences relatives du projecteur source et de l'élément d'excitation du transducteur d'équilibre se neutralisent, le déplacement du tube extérieur est égal à zéro; la pression acoustique au voisinage du transducteur d'équilibre est alors égale à:

$$p = \frac{d E}{r} U_e \quad (9.4)$$

où :

$\frac{d E}{r}$ est une constante caractéristique du transducteur d'équilibre piézo-électrique

d est la constante piézo-électrique du matériau du tube

E est le module de Young du matériau du tube

r est le rayon moyen de l'élément d'excitation

U_e est la tension de compensation à la fréquence f

Le coefficient $\frac{d E}{r} = \frac{p}{U_e}$ est généralement indépendant de la fréquence. Ce coefficient peut être déterminé expérimentalement en faisant varier sinusoidalement le niveau de l'eau au-dessus du transducteur d'équilibre d'une amplitude Δh et en compensant la déformation résultante du transducteur d'équilibre au moyen d'une tension de compensation d'une amplitude ΔU_e appliquée au projecteur d'équilibre (voir la figure 4, page 50). Cette tension de compensation devra avoir la même fréquence que le mouvement du niveau de l'eau. Elle peut être dérivée soit à partir du générateur qui commande la variation du niveau de l'eau, soit à partir d'un capteur de pression qui transforme le déplacement sinusoidal du niveau de l'eau en une tension alternative.

Note. — Pour cette opération, la cavité de la cuve de mesure est reliée par un tube souple à un récipient ouvert, fixé sur un pot vibrant, communiquant des oscillations sinusoidales verticales d'une amplitude connue. La fréquence vibratoire doit être assez basse (0,3 Hz) pour que les forces d'inertie apparaissant dans le liquide vibrant soient négligeables.

La phase et l'amplitude ΔU_e de la tension de compensation sont ajustées jusqu'à ce que le déplacement du transducteur d'équilibre soit égal à zéro.

Ainsi:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \rho g \Delta h \\ \frac{d E}{r} &= \frac{\Delta p}{\Delta U_e} = \frac{\rho g \Delta h}{\Delta U_e} \end{aligned} \quad (9.5)$$

où:

Δp est l'amplitude vibratoire de la pression hydrostatique

Δh est l'amplitude vibratoire du niveau d'eau

ΔU_e est l'amplitude de la tension de compensation

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

$$M_{pH} = \frac{U}{p} = \frac{U}{U_e} \cdot \frac{\Delta U_e}{\rho g \Delta h} \quad (9.6)$$

où U est la tension de sortie en circuit ouvert de l'hydrophone H à la pression p , qui dépend de la fréquence (voir les notes 1 à 3 du paragraphe 9.4).

with respect to the voltage at the source projector until the output voltage at the outer shell is zero. The source projector and the driving shell are fed by the same signal generator.

The hydrophone to be calibrated is placed close to the centre of the null transducer. Special requirements for frequencies higher than 1 kHz are given in Sub-clause 9.9.

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 is then equal to:

$$p = \frac{d E}{r} U_c \quad (9.4)$$

where:

$\frac{d E}{r}$ is a characteristic constant of the piezoelectric null transducer

d is the piezoelectric constant of the shell material

E is the Young's modulus of the shell material

r is the mean radius of driving transducer

U_c is the compensation voltage at the frequency f

The factor $\frac{d E}{r} = \frac{p}{U_c}$ is generally independent of the frequency. This factor can be determined experimentally by harmonically changing the water level over the null transducer with an amplitude Δh 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, page 51). This compensation voltage should have the same frequency as the oscillation of the water level. It can 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. — 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 are adjusted until the displacement of the null transducer is zero.

Then:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \rho g \Delta h \\ \frac{d E}{r} &= \frac{\Delta p}{\Delta U_c} = \frac{\rho g \Delta h}{\Delta U_c} \end{aligned} \quad (9.5)$$

where:

Δp is the amplitude of the hydrostatic pressure oscillation

Δh is the amplitude of the water level oscillation

ΔU_c is the amplitude of the compensation voltage

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

$$M_{pH} = \frac{U}{p} = \frac{U}{U_c} \cdot \frac{\Delta U_c}{\rho g \Delta h} \quad (9.6)$$

where U is the open circuit output voltage of the hydrophone H at a pressure p , dependent on the frequency (see Notes 1 to 3 of Sub-clause 9.4).

9.6 Réalisation de la chambre de compensation électrodynamique

La cuve peut être construite à partir d'un tuyau muni d'armatures l'adaptant au projecteur, au transducteur électrodynamique d'équilibre et à l'hydrophone à étalonner.

Le projecteur source doit fournir un niveau de pression suffisamment élevé pour garantir un rapport suffisamment grand du signal mesuré au bruit.

On prend les précautions suivantes:

- 1) la cuve doit être conçue de telle sorte que l'air emprisonné puisse être aisément évacué;
- 2) la complaisance acoustique des parois de la cuve doit être inférieure à celle du volume d'eau;
- 3) une étanchéité par lamelle et gorge ou garniture métallique est préférable à l'emploi de joints ayant une plus grande complaisance;
- 4) la conception de la cuve et le montage de projecteur source doivent être tels que les modes de vibration en flexion des parois de la cuve soient excités le moins possible;
- 5) on prend toutes les mesures nécessaires pour éviter l'influence de toute vibration de la cuve sur le transducteur d'équilibre et l'hydrophone.

La complaisance acoustique des parois de la cuve dans la bande infrasonore peut être déterminée expérimentalement (voir [45] à [47a]).

A cet effet, la cuve est munie d'un tube étroit de section efficace S constante, de telle sorte qu'elle corresponde à un résonateur de Helmholtz. Sa fréquence de résonance est déterminée maintenant par la complaisance acoustique de la cuve remplie d'eau et par la masse d'eau contenue dans le tube.

Avec une masse d'eau m_1 dans le tube, on mesure une fréquence de résonance f_1 . Lorsque la masse d'eau devient m_2 , la fréquence de résonance se change en f_2 .

Ces deux mesures permettent de déterminer la complaisance de la cuve remplie d'eau par l'équation:

$$C_{mt} = \frac{1}{4\pi^2(m_2 - m_1)} \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \quad (9.7)$$

où C_{mt} est la complaisance mécanique de la cuve remplie d'eau

La mesure des largeurs de bande Δf_1 et Δf_2 des deux fréquences de résonance respectives f_1 et f_2 conduit à la complaisance acoustique C_t .

$$C_t = \frac{1}{\pi^2} \frac{S^2}{m_2 - m_1} \left\{ \frac{1}{4f_2^2 - \Delta f_2^2} - \frac{1}{4f_1^2 - \Delta f_1^2} \right\} \quad (9.8)$$

où S est la section efficace du tube du résonateur

La complaisance acoustique du volume d'eau dans la cuve est égale à:

$$C_w = \frac{V}{\rho c^2} \quad (9.9)$$

où:

V est le volume d'eau dans la cuve

c est la vitesse du son en champ libre dans l'eau

Si la cuve est cylindrique, la complaisance acoustique des parois de la cuve est égale à:

$$C_c = \frac{V D (5 - 4 \sigma)}{4 E t} \quad (9.10)$$

où:

D est le diamètre moyen de la cuve cylindrique

σ est le coefficient de Poisson du matériau des parois

E est le module de Young du matériau des parois

t est l'épaisseur des parois

9.6 Design of the electrodynamic compensation chamber

The tank can be constructed from a pipe and fittings to suit the projector, the electrodynamic null-transducer and the hydrophone to be calibrated.

The source projector shall produce a sufficiently high pressure level to ensure enough excess of the measured signal over the noise.

The following precautions are taken:

- 1) the tank must be constructed in such a way that entrapped air can readily be removed;
- 2) the acoustic compliance of the tank walls should be less than the compliance of the water volume;
- 3) tongue-and-groove or metal gasketing is preferable to more compliant seals;
- 4) the tank must be designed and the source projector mounted in such a way that excitation of flexural modes of vibration of the tank walls is minimized;
- 5) all necessary measures are taken to avoid the influence of any vibration of the tank on the null transducer and the hydrophone.

The acoustic compliance of the tank walls in the infrasonic range can be determined experimentally (see [45] to [47a]).

For this purpose, the tank is equipped with a narrow tube of a constant cross-section S so that it becomes a Helmholtz resonator. Its resonance frequency is now determined by the acoustic compliance of the tank filled with water and by the mass of water in the tube.

With a water mass m_1 in the tube a resonance frequency f_1 is measured. When the water mass in the tube is changed to m_2 , the resonance frequency is shifted to f_2 .

With these two measurements, the compliance of the tank filled with water can be determined, according to the equation:

$$C_{mt} = \frac{1}{4\pi^2(m_2 - m_1)} \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \quad (9.7)$$

where C_{mt} is the mechanical compliance of the tank filled with water

Measurement of the bandwidths Δf_1 and Δf_2 of the two resonance frequencies f_1 and f_2 respectively yields the acoustic compliance C_t .

$$C_t = \frac{1}{\pi^2} \frac{S^2}{m_2 - m_1} \left\{ \frac{1}{4f_2^2 - \Delta f_2^2} - \frac{1}{4f_1^2 - \Delta f_1^2} \right\} \quad (9.8)$$

where S is the area of cross-section of the resonator tube

The acoustic compliance of the water volume in the tank is equal to:

$$C_w = \frac{V}{\rho c^2} \quad (9.9)$$

where:

V is the volume of water in the tank

c is the free-field speed of sound in water

If the tank is cylindrical, the acoustic compliance of the tank walls is equal to:

$$C_o = \frac{V D (5 - 4 \sigma)}{4 E t} \quad (9.10)$$

where:

D is the mean diameter of the cylindrical tank

σ is Poisson's ratio of the wall material

E is Young's modulus of the wall material

t is the thickness of the wall

Dans cette équation, la complaisance des embouts et de la garniture métallique est négligée.

La méthode de résonance pour déterminer les complaisances C_{mt} et C_t (voir les équations (9.7) et (9.8)) fait intervenir non seulement la cuve elle-même avec l'eau qu'elle contient, mais également les transducteurs placés dans la cuve ainsi que les bulles d'air qui s'y trouveraient.

Une autre méthode est décrite (voir [47a]): deux corps différents avec des compressibilités connues (par exemple des blocs de laiton avec des dimensions différentes) sont utilisés pour mesurer la complaisance de la chambre, une fois avec un corps et une fois avec l'autre. La complaisance de la chambre seule peut être déduite de ces deux mesures.

Aux fréquences inférieures à la condition d'ondes stationnaires et à la résonance la plus basse de la cuve, la charge acoustique sur le projecteur source est égale à la somme des complaisances des parois de la cuve et du volume d'eau $C_w + C_e$.

Dans la pratique actuelle, la charge acoustique varie pratiquement entre ce minimum théorique et une valeur environ trois fois plus grande, à cause de la complaisance de l'hydrophone, des bulles d'air, etc. La pression dans la cuve en est modifiée en conséquence.

Aux fréquences élevées, la réactance mécanique de la masse d'eau vibrante peut créer un gradient de pression à l'intérieur de la cuve. Il convient alors de placer le projecteur d'équilibre dans une zone de vitesse négligeable pour garantir une mesure de pression acoustique uniforme et correcte.

Si les conditions ambiantes doivent être contrôlées, on équipe la cuve pour le dégazage, la circulation et la pressurisation de l'eau, ainsi que pour le contrôle de sa température. En cas de besoin, il convient de munir les transducteurs électrodynamiques d'arrivées d'air pressurisé pour compenser la pression hydrostatique dans la cuve.

9.7 *Réalisation de la chambre de compensation piézo-électrique*

Selon la gamme de fréquences, deux types de chambres sont utilisées dans la méthode de compensation piézo-électrique: l'une pour les basses fréquences et l'autre pour les hautes fréquences.

La chambre pour basses fréquences est semblable à celle qui est utilisée dans la méthode de compensation électrodynamique (voir le paragraphe 9.6).

Ce type de cuve peut être construit à partir d'un tuyau muni d'armatures l'adaptant au projecteur. L'hydrophone à mesurer et le transducteur piézo-électrique d'équilibre sont montés à part.

La chambre pour hautes fréquences est représentée schématiquement sur la figure 5, page 52. La principale caractéristique technologique consiste en ce que les dimensions linéaires sont réduites le plus possible en vue d'augmenter la limite supérieure de fréquence au-delà de 1 kHz.

Le transducteur piézo-électrique d'équilibre se compose de deux tubes concentriques cylindriques en céramique piézo-électrique pressés entre deux rebords massifs. L'espace entre les deux cylindres est rempli d'un matériau isolant élastique. Le transducteur d'équilibre forme la paroi cylindrique de la chambre, et la cavité de mesure de la chambre n'est pas plus grande que le volume interne du tube intérieur. La pression alternative est produite par le projecteur source, qui est un projecteur piézo-électrique plan 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.

L'hydrophone est placé sur le couvercle de la chambre. Les mêmes précautions que celles qui sont indiquées au paragraphe 9.6 relatives à la méthode de compensation électrodynamique doivent être prises pour la réalisation de la cuve. En outre, des précautions doivent être prises pour diminuer l'influence de la déformation longitudinale des tubes 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.

In this equation, the compliance of the end-caps and gasketing is neglected.

The resonance technique for the determination of the compliances C_{mt} and C_t (see equations (9.7) and (9.8)) takes into account not only the tank itself with the water inside, but also the transducers mounted in the tank and the possible air bubbles present.

Another method is described (see [47a]): two different bodies of known compressibility (e.g. blocks of brass of different size) are used to measure the compliance of the chamber, once with one body, once with the other. From these two measurements the compliance of the chamber alone can be calculated.

At frequencies below the condition of standing waves and the lowest resonance of the tank, the acoustic load on the source projector is equal to the sum of the compliances of the tank walls and the water volume $C_w + C_c$.

In actual practice, the acoustic load will vary between this theoretical minimum and a value about three times the minimum because of the compliance of the hydrophone, air bubbles, etc. The pressure in the tank will change accordingly.

At high frequencies, the mechanical reactance of the vibrating water mass may cause a pressure gradient inside the tank. Therefore the null-transducer should be located in a region of negligible velocity to ensure a uniform and correct sound pressure measurement.

If ambient conditions are to be controlled, the tank is equipped with facilities for degassing, circulating and pressurizing the water and for controlling its temperature. If necessary, the electrodynamic transducers are provided with inlets for pressurized air to compensate for the hydrostatic pressure in the tank.

9.7 *Design of the piezoelectric compensation chamber*

Depending on the frequency range, two types of chambers are used in the piezoelectric compensation method, one for low frequencies and one for high frequencies.

The low frequency chamber is similar to that used in the electrodynamic compensation method (see Sub-clause 9.6).

This type of tank can be constructed from pipe and fittings to suit the projector. The hydrophone to be measured and the piezoelectric null transducer are installed as separate units.

The high frequency chamber is shown schematically in Figure 5, page 53. The main design feature is that the linear dimensions are made as small as possible in order to increase the upper frequency limit to above 1 kHz.

The piezoelectric null transducer consists of two concentric cylindrical piezoelectric ceramic shells, clamped between two massive flanges. The space between the two cylinders is filled with an elastic, non-conducting material. The null transducer forms the cylindrical wall of the chamber; and the measuring cavity of the chamber is not larger than the internal volume of the inner shell. The alternating pressure is generated by the source projector, a plane 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.

The hydrophone is mounted on the lid of the chamber. The same precautions must be taken in the design of the chamber as those listed in Sub-clause 9.6 for the electrodynamic compensation chamber. Moreover, precautions must 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.

9.8 Limites pratiques de la méthode de compensation électrodynamique

Dans l'intervalle de fréquences de 0 Hz à 1 000 Hz, la précision de l'étalonnage avec la méthode d'équilibrage utilisant deux projecteurs est meilleure que $\pm 0,5$ dB.

La limite supérieure de fréquence est imposée par l'erreur dans l'obtention de l'équilibre, par l'hétérogénéité du champ de pression au voisinage du projecteur d'équilibre et par l'inégalité entre la sensibilité mesurée et la sensibilité en champ libre. L'imprécision de la détermination de la compensation est provoquée par l'accroissement de la réactance mécanique du transducteur d'équilibre en fonction de l'augmentation de la fréquence, se traduisant par une diminution de la sensibilité du capteur de déplacement.

La limite supérieure de fréquence est atteinte lorsque, après qu'un équilibre a été obtenu, aucun changement significatif dans la lecture du détecteur de déplacement n'est observé si le projecteur d'équilibre est déconnecté électriquement.

Une hétérogénéité de la pression acoustique dans la cuve peut provenir d'ondes stationnaires ou d'un gradient de vitesse au voisinage de la source. L'existence de cette hétérogénéité dans le champ acoustique est mise en évidence lorsque la valeur de la sensibilité de l'hydrophone dépend de son emplacement dans la cuve.

A la seule condition que la constante de diffraction de l'hydrophone soit égale à l'unité et que l'impédance acoustique apparente de l'hydrophone dans la cuve soit égale à l'impédance en champ libre, cet étalonnage est équivalent à un étalonnage en champ libre.

9.9 Limites pratiques de la méthode de compensation piézo-électrique

Les paramètres mécaniques et électriques de la chambre limitent la bande de fréquences dans laquelle l'étalonnage peut être effectué.

Une limite supérieure de fréquence 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 telle sorte que le niveau de sortie de l'hydrophone dépend de sa position dans la chambre.

Indépendamment de la construction de la chambre, on n'utilise pas, en principe, le système au-delà d'une fréquence située à environ deux tiers de la fréquence de résonance fondamentale de la cavité de la cuve.

Une limite inférieure de fréquence 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.

Cette méthode, moyennant une conception judicieuse de la chambre, permet de couvrir une gamme de fréquences de 1 Hz à 5 000 Hz.

Si l'hydrophone est symétrique, il devra être 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 gamme de fréquences peut être étendue.

Notes 1. — 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.

2. — 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.

9.8 *Practical limitations of the electrodynamic compensation method*

Within a frequency range of 0 Hz to 1 000 Hz the accuracy of the calibration with the “two projectors null method” is better than ± 0.5 dB.

The upper frequency limit is imposed by the inaccuracy in the determination of the null balance, by inhomogeneity of the pressure field near the null projector and by inequality between the measured and the free-field sensitivity. Inaccuracy of the determination of the compensation is caused by the increase of the mechanical reactance of the null transducer with increasing frequency, resulting in a decrease of the sensitivity of the displacement sensor.

The upper frequency limit is reached when, after a null balance is obtained, no significant change in the reading of the displacement detector is observed when the null projector is electrically disconnected.

Inhomogeneity of the sound pressure in the tank may be caused by standing waves or by a velocity gradient near to the source. Inhomogeneity in the sound field exists if the measured sensitivity of the hydrophone depends on its location in the tank.

This calibration is equivalent to a free-field calibration only if the diffraction constant of the hydrophone is unity and the apparent acoustic impedance of the hydrophone in the tank is equal to the impedance in a free field.

9.9 *Practical limitations of the piezoelectric compensation method*

Mechanical and electrical parameters of the chamber restrict the frequency range within which the calibration may be performed.

An upper frequency limit 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 should not be used at a frequency higher than about two-thirds of the fundamental resonance frequency of the tank cavity.

A low-frequency limit 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.

By a proper design of the chamber a frequency range from 1 Hz to 5 000 Hz can be covered by this method.

If the hydrophone is symmetrical, it should be so arranged in the chamber that the planes of 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.

Notes 1. — 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.

2. — 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.

Si les conditions indiquées dans le paragraphe 9.8 sont réalisées, l'étalonnage par la méthode de compensation piézo-électrique est équivalent à un étalonnage en champ libre, avec un écart possible ne dépassant pas ± 1 dB.

Jusqu'aux fréquences d'environ le cinquième de la fréquence de la première résonance de la chambre, la précision de l'étalonnage est supérieure à $\pm 0,3$ dB.

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

A l'étude.

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

A l'étude.

Withdrawing
IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60565:1977

If the conditions given in Sub-clause 9.8 are satisfied, the calibration by the piezoelectric compensation method is equivalent to a free-field calibration, with a possible deviation of less than ± 1 dB.

At frequencies up to about one fifth of the lowest resonance frequency of the chamber, the accuracy of the calibration is better than ± 0.3 dB.

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

Under consideration.

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

Under consideration.

Withdrawing
IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60565:1977

ANNEXE A

MESURE DU MODULE DE L'IMPÉDANCE DE TRANSFERT PAR LA MÉTHODE DE SUBSTITUTION

Cette mesure se réfère au paragraphe 6.5.3.

Le schéma de la chaîne de mesure est donné aux figures 6 et 7, page 66.

La figure 6 correspond à la *partie acoustique*:

Le projecteur est alimenté par un générateur de signaux et un amplificateur de puissance, en série avec une résistance de précision R .

La tension U_R aux bornes de cette résistance est déterminée au moyen d'un indicateur stable et fidèle ayant une grande sensibilité différentielle. Cet indicateur peut être un voltmètre, un oscilloscope ou un enregistreur de niveau.

Si l'intensité du courant dans le projecteur est I_P , on a:

$$U_R = I_P R \quad (A1)$$

La tension U_H aux bornes de l'hydrophone, due à la pression acoustique, est amplifiée γ fois par un amplificateur à gain variable, et repérée sur le même indicateur que pour le courant du projecteur.

Le gain γ est choisi de telle façon que la lecture de l'indicateur soit identique à la précédente:

$$\gamma U_H = U_R \quad (A2)$$

Pour cela l'indicateur est alternativement connecté au circuit du projecteur et au circuit de l'hydrophone.

La figure 7 correspond à la *seconde partie*, mesure purement électrique.

Le signal émis par le générateur de signaux est injecté dans un atténuateur de précision ayant une impédance Z . Cet atténuateur est relié par une résistance en série à la résistance d'insertion en tension R_i en série avec l'hydrophone. La résistance totale, somme de la résistance en série, de la résistance d'insertion en tension et des conducteurs de câble de liaison à l'hydrophone, doit être égale à Z à 1% près.

Ne pas modifier le gain γ de l'amplificateur. L'indicateur de tension est maintenant alternativement branché à l'entrée de l'atténuateur ou à la sortie de l'amplificateur. L'atténuation produite par l'atténuateur de précision est réglée jusqu'à ce que la même tension soit lue dans les deux cas. Si l'atténuation est maintenant égale à K ($K > 1$), on a:

$$\gamma = \frac{Z K}{R_i} \quad (A3)$$

Les équations (A1) et (A2) donnent:

$$I_P R = \gamma U_H \quad (A4)$$

d'où:

$$I_P R = \frac{Z K U_H}{R_i} \quad (A5)$$

APPENDIX A

MEASUREMENT OF TRANSFER IMPEDANCE MAGNITUDE BY THE SUBSTITUTION METHOD

Reference is made to Sub-clause 6.5.3.

The circuit diagram of the measuring equipment is shown in Figures 6 and 7, page 67.

Figure 6 refers to the *acoustical step*:

The projector is fed from a signal generator and a power amplifier, in series with a precision resistor R .

The voltage U_R across this resistor is indicated by a stable and reliable indicator with a large incremental sensitivity. This indicator may be a voltmeter, an oscilloscope or a level recorder.

If the projector current is I_P , we have:

$$U_R = I_P R \quad (A1)$$

The voltage U_H at the hydrophone terminals, caused by the sound pressure, is amplified by a variable factor γ , and its output indicated on the same indicator as for the projector current.

The gain γ is chosen such that the reading of the indicator is the same as before:

$$\gamma U_H = U_R \quad (A2)$$

For this purpose the indicator is switched alternately to the projector circuit and to the hydrophone circuit.

Figure 7 refers to the *second step*, a purely electrical measurement.

The signal from the signal generator is fed through a precision attenuator with an impedance Z . This attenuator is connected with a series resistor to the voltage insertion resistor R_i in series with the hydrophone. The total resistance of the series resistor, the voltage insertion resistor and the cable wires to the hydrophone, shall be equal to Z within 1%.

The gain γ of the amplifier must not be changed. The indicator is switched alternately to the input of the attenuator or to the output of the amplifier. The attenuation of the precision attenuator is set until the same voltage is read in both cases. If the magnitude of the attenuation is denoted by K ($K > 1$), then:

$$\gamma = \frac{Z K}{R_i} \quad (A3)$$

Equations (A1) and (A2) yield:

$$I_P R = \gamma U_H \quad (A4)$$

hence:

$$I_P R = \frac{Z K U_H}{R_i} \quad (A5)$$

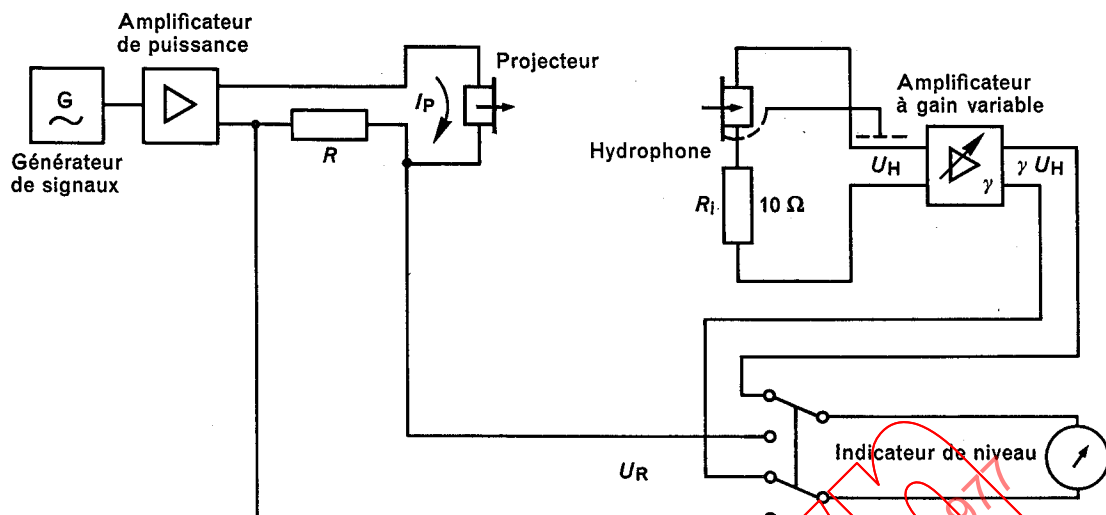


FIG. 6. — Partie acoustique.

175/77

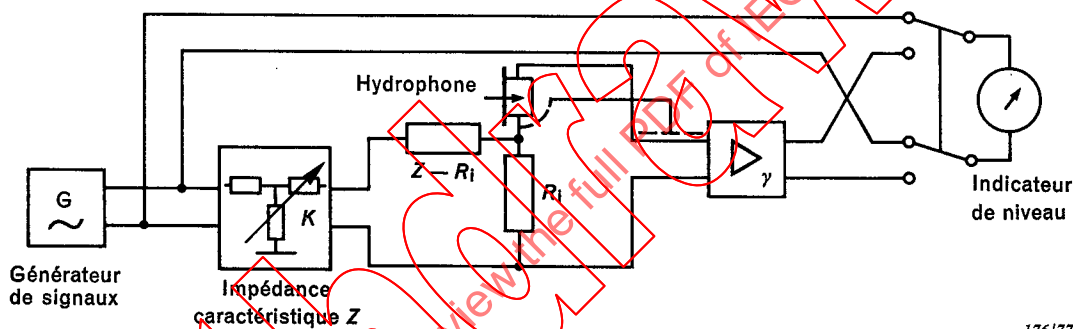


FIG. 7. — Partie électrique.

176/77

Le module de l'impédance de transfert $|Z_{PH}|$ de ce couple projecteur-hydrophone a été défini au paragraphe 3.14 par:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_H}{I_P} \quad (A6)$$

De telle sorte que:

$$|Z_{PH}| = \frac{R_i R}{|Z K|} \quad (A7)$$

Il suffit de connaître les valeurs de R_i , R , Z et K avec une précision de $\pm 1\%$ pour calculer $|Z_{PH}|$ avec une précision de $\pm 4\%$.

L'atténuateur est habituellement étalonné en décibels. On prévoit la possibilité de changer l'atténuation avec un pas de 0,1 dB, sa précision étant supérieure à $\pm 0,1$ dB.

En tenant compte de ce que la valeur de K , exprimée en décibels, est $20 \log K$, on trouve pour $|Z_{PH}|$ la valeur suivante:

$$20 \log \frac{|Z_{PH}|}{Z_{\text{réf}}} = 20 \log \frac{R_i R}{Z Z_{\text{réf}}} - 20 \log K \quad (A8)$$

The magnitude of the transfer impedance $|Z_{PH}|$ of this projector hydrophone pair was defined in Sub-clause 3.14 as:

So that:

Knowledge of the values of R_i , R , Z and K with a precision of $\pm 1\%$ is sufficient to calculate $|Z_{PH}|$ with an accuracy of $\pm 4\%$.

Commonly the attenuator is calibrated in decibels. It is possible to change the attenuation in steps of 0.1 dB, while its accuracy should be better than ± 0.1 dB.

In terms of the reading of the attenuator, $20 \log K$ dB, equation A7 is written as follows:

$$20 \log \frac{|Z_{\text{PH}}|}{Z_{\text{ref}}} = 20 \log \frac{R_i R}{Z Z_{\text{ref}}} - 20 \log K \quad (\text{A8})$$

Le niveau de la sensibilité de l'hydrophone M_H est alors calculé d'après l'équation 7.11 par les formules suivantes:

$$20 \log \frac{M_H}{M_{\text{réf}}} = 10 \log \frac{2d}{\rho f H} + 10 \log \frac{|Z_{\text{PH}}|}{Z_{\text{réf}}} + 10 \log \frac{|Z_{\text{TH}}|}{Z_{\text{réf}}} - 10 \log \frac{|Z_{\text{PT}}|}{Z_{\text{réf}}} \quad (\text{A9})$$

$$= 10 \log \frac{2 R_i R d}{\rho f Z H Z_{\text{réf}}} + 10 \log K_{\text{PH}} + 10 \log K_{\text{TH}} - 10 \log K_{\text{PT}} \quad (\text{A10})$$

Dans ces équations, K_{PH} , K_{TH} et K_{PT} sont les réglages d'atténuation correspondant aux mesures respectives de $|Z_{\text{PH}}|$, $|Z_{\text{TH}}|$ et $|Z_{\text{PT}}|$,

où:

$$Z_{\text{réf}} = 1 \Omega$$

$$M_{\text{réf}} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$$

$$\text{et } H \text{ est égal à } \frac{d_{\text{réf}}}{\rho_{\text{réf}} f_{\text{réf}}} \left(\frac{M_{\text{réf}}}{1 \text{ V/Pa}} \right)^2 = 10^{-12} \text{ m}^4 \text{ s kg}^{-1}$$

avec:

$$d_{\text{réf}} = 1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{réf}} = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{\text{réf}} = 1 \text{ Hz}$$

Note. — La plus petite valeur de K ne peut être inférieure à l'unité. Par suite, la plus grande valeur de $|Z_{\text{PH}}|$ qui puisse être mesurée de cette façon est, d'après l'équation A7:

$$|Z_{\text{PH}}| \leq \frac{R_i R}{Z} \quad (\text{A11})$$

On choisit les valeurs des résistances en série R et R_i suffisamment élevées pour permettre que la plus grande valeur de $|Z_{\text{PH}}|$ corresponde à un réglage d'atténuateur supérieur à 0 dB. Une faible valeur de l'impédance caractéristique Z de l'atténuateur est favorable à cette condition.

Avec $R = R_i = 10 \Omega$ et $Z = 60 \Omega$, la plupart des transducteurs de laboratoire utilisés habituellement peuvent être étalonnés.

Voir [13].

The level of the hydrophone sensitivity M_H is to be calculated in accordance with equation 7.11 by means of the following formula:

$$20 \log \frac{M_H}{M_{\text{ref}}} = 10 \log \frac{2 d}{\rho f H} + 10 \log \frac{|Z_{\text{PH}}|}{Z_{\text{ref}}} + 10 \log \frac{|Z_{\text{TH}}|}{Z_{\text{ref}}} - 10 \log \frac{|Z_{\text{PT}}|}{Z_{\text{ref}}} \quad (\text{A9})$$

$$= 10 \log \frac{2 R_i R d}{\rho f Z H Z_{\text{ref}}} + 10 \log K_{\text{PH}} + 10 \log K_{\text{TH}} - 10 \log K_{\text{PT}} \quad (\text{A10})$$

In these equations, K_{PH} , K_{TH} and K_{PT} are the attenuation settings for the measurements of $|Z_{\text{PH}}|$, $|Z_{\text{TH}}|$ and $|Z_{\text{PT}}|$ respectively,

where:

$$Z_{\text{ref}} = 1 \Omega$$

$$M_{\text{ref}} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$$

$$\text{and } H \text{ is equal to } \frac{d_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}} f_{\text{ref}}} \left(\frac{M_{\text{ref}}}{1 \text{ V/Pa}} \right)^2 = 10^{-12} \text{ m}^4 \text{ s kg}^{-1}$$

with:

$$d_{\text{ref}} = 1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{ref}} = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{\text{ref}} = 1 \text{ Hz}$$

Note. — The smallest value of K cannot be less than unity. Hence, the largest value of $|Z_{\text{PH}}|$ that can be measured in this way is, according to equation A7:

$$|Z_{\text{PH}}| \leq \frac{R_1 R}{Z} \quad (\text{A11})$$

The value of the series resistors R and R_1 are chosen high enough to ensure that the largest value of $|Z_{\text{PH}}|$ corresponds with an attenuator setting larger than 0 dB. A low value of the characteristic impedance Z of the attenuator is favourable in this respect.

With $R = R_1 = 10 \Omega$ and $Z = 60 \Omega$ most of the commonly used laboratory transducers can be calibrated.

See [13].

ANNEXE B

MESURE DU MODULE DE L'IMPÉDANCE DE TRANSFERT PAR LA MÉTHODE DE LECTURE DIRECTE

Cette mesure se réfère au paragraphe 6.5.4.

Le principe de cette méthode est de réduire la part de calcul qui intervient dans l'équation (7.6):

$$M_T^2 = \frac{2 d |Z_{TP}| |Z_{TH}|}{\rho f |Z_{PH}|}$$

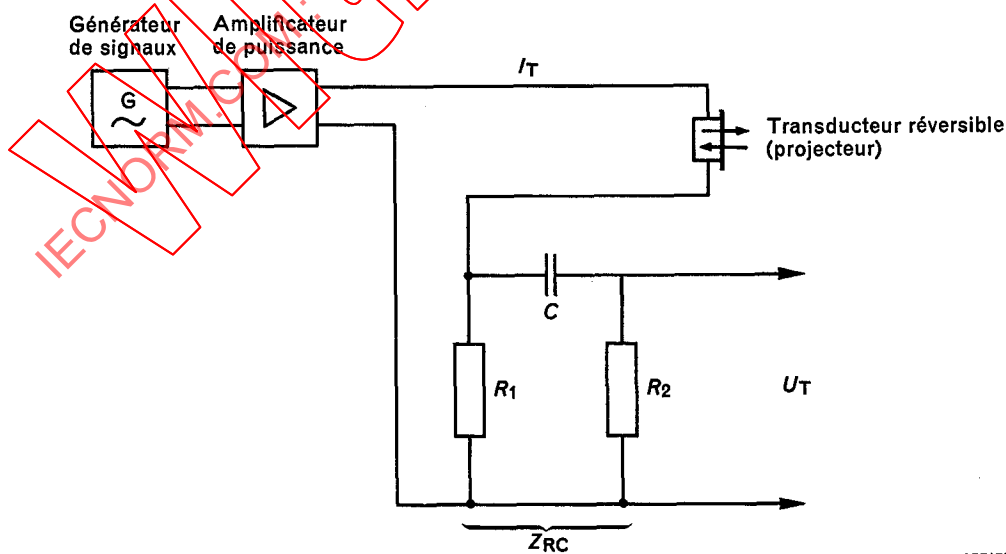
au moyen d'un simple calculateur analogique, dans lequel le paramètre de réciprocité, fonction de la fréquence, $\frac{2d}{\rho f}$ est représenté par un circuit R-C et où la sensibilité de l'hydrophone est directement lue sur le cadran d'un atténuateur quadratique.

Le processus d'étalonnage, dans ce cas, ne nécessite aucune mesure absolue et consiste à amener à un même niveau sur l'indicateur deux tensions au moyen de deux diviseurs résistifs.

La transformation de l'impédance de transfert $|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T}$ peut se faire au moyen d'un circuit électrique d'impédance connue Z_{RC} formé de la mise en parallèle de la résistance de précision R_1 et du circuit différentiel $R_2 C$ (voir la figure 8).

$$C \approx 3\,000 \text{ pF}$$

$$30 \, \Omega < R_2 < 3\,000 \, \Omega$$



177/77

FIG. 8. — Procédé de transformation de l'impédance de transfert.

APPENDIX B

MEASUREMENT OF THE TRANSFER IMPEDANCE MAGNITUDE BY THE DIRECT READ-OUT METHOD

Reference is made to Sub-clause 6.5.4.

The principle of this method is to reduce the work involved in the calculation of equation (7.6):

$$M_T^2 = \frac{2 d}{\rho f} \frac{|Z_{TP}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|}$$

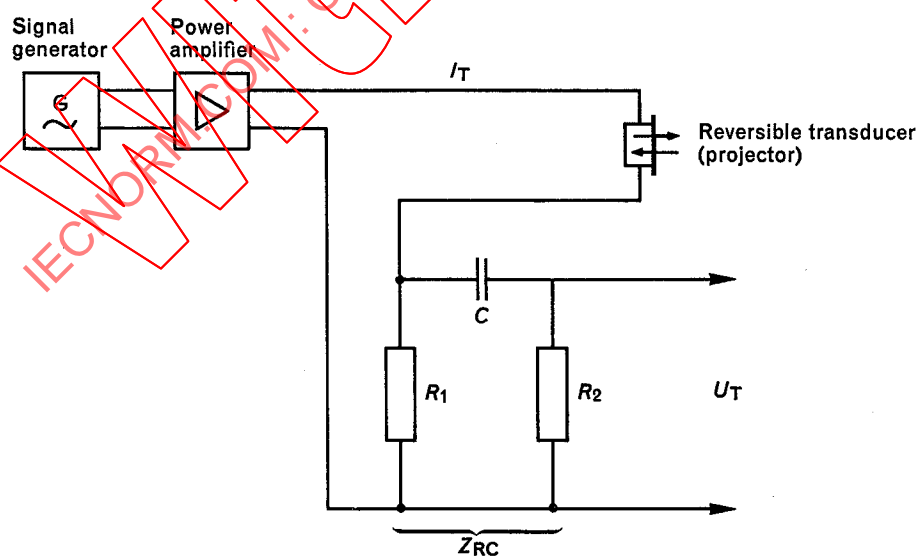
by means of a simple analogue computer, in which the frequency dependent reciprocity parameter $\frac{2 d}{\rho f}$ is represented by an R-C circuit and where the sensitivity of the hydrophone is read directly from the scale of a quadratic attenuator.

The calibration procedure, in this case, does not require any absolute measurements and consists in equalization of two voltages on the level indicator by means of two resistive dividers.

The transformation of transfer impedance $|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T}$ is obtained by means of the electric circuit with known impedance Z_{RC} formed by the parallel combination of the precision resistor R_1 and the differentiating circuit $R_2 C$ (see Figure 8).

$$C \approx 3\,000 \text{ pF}$$

$$30 \, \Omega < R_2 < 3\,000 \, \Omega$$



177/77

FIG. 8. — Transfer impedance transformation technique.

On peut déduire de la figure 8, page 70:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{U_{TH}}{U_T} Z_{RC} \quad (B1)$$

où $Z_{RC} = 2\pi f C R_1 R_2$

si $(R_1 + R_2)^2 \omega^2 C^2 \ll 1$

U_{TH} est la tension aux bornes de l'hydrophone et I_T l'intensité du courant dans le transducteur réversible, ce dernier étant utilisé comme projecteur.

L'erreur provenant de cette approximation ne dépasse pas 1% si $(R_1 + R_2) C \ll \frac{0,02}{f_{\max}}$ et si la résistance de fuite à la terre du transducteur réversible est au moins mille fois supérieure à la résistance R_1 .

La formule qui donne la sensibilité M_H de l'hydrophone est analogue à l'équation (7.11):

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} \cdot \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} = \frac{2d}{\rho f} \frac{U_{PH}}{U_{PT}} |Z_{TH}| \quad (B2)$$

où U_{PH} et U_{PT} sont les tensions de sortie de l'hydrophone et du transducteur réversible utilisé comme récepteur.

En remplaçant $|Z_{TH}|$ par Z_{RC} , on obtient l'expression:

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} Z_{RC} \frac{U_{PH}}{U_{PT}} \frac{U_{TH}}{U_T} = M_0^2 \frac{U_{PH}}{U_{PT}} \frac{U_{TH}}{U_T} \quad (B3)$$

où le facteur $M_0^2 = \frac{4\pi d R_1 R_2 C}{\rho}$ a la dimension d'une sensibilité au carré. Il est indépendant de la fréquence et peut être choisi pour un circuit de mesure donné comme constante déduite du système d'unités utilisé et de la graduation du système de mesure (atténuateur). Les rapports des tensions $\frac{U_{PH}}{U_{PT}}$ et $\frac{U_{TH}}{U_T}$ peuvent être aussi introduits dans le circuit comme facteurs de transmission des diviseurs de tension.

Processus d'étalonnage

Trois étapes composent le processus d'étalonnage. A chaque étape, on réalise l'égalité de deux tensions au moyen de l'indicateur de niveau. Cela réalise l'égalité des facteurs de transmission des circuits correspondants.

Dans la première étape, selon le schéma de la figure 9, page 74, les tensions de sortie U_{PH} de l'hydrophone étalonné et U_{PT} du transducteur réversible utilisé comme récepteur sont comparées et le rapport $\frac{U_{PH}}{U_{PT}}$ est fixé par l'intermédiaire du facteur Y_1 du potentiomètre D_1 :

$$K_1 U_{PH} = Y_1 U_{PT} \quad \frac{U_{PH}}{U_{PT}} = \frac{Y_1}{K_1} \quad (B4)$$

K_1 est le facteur de transmission du diviseur de précision utilisé lorsque $U_{PH} > U_{PT}$.

Dans la deuxième étape, selon le schéma de la figure 10, page 74 (voir aussi la figure 8), le rapport des tensions $\frac{U_{TH}}{U_T}$ est fixé par l'intermédiaire du facteur de transmission Y_2 du potentiomètre D_2 . Comme dans la première étape, cela est réalisé par l'égalisation de la tension de sortie de l'hydrophone et la tension de sortie du potentiomètre D_2 .

$$U_{TH} = Y_2 U_T \quad \frac{U_{TH}}{U_T} = Y_2 \quad (B5)$$

As follows from Figure 8, page 71:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{U_{TH}}{U_T} Z_{RC} \quad (B1)$$

where $Z_{RC} = 2\pi f C R_1 R_2$

if $(R_1 + R_2)^2 \omega^2 C^2 \ll 1$

U_{TH} is the voltage at the hydrophone terminals and I_T is the current flowing through the reversible transducer, the latter being used as a projector.

The error of this approximation does not exceed 1% if $(R_1 + R_2) C \ll \frac{0.02}{f_{\max}}$ and if the leakage resistance to earth of the reversible transducer is at least one thousand times more than the value of the resistor R_1 .

The formula for determination of the hydrophone sensitivity M_H has the form of equation (7.11):

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} \cdot \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} = \frac{2d}{\rho f} \frac{U_{PH}}{U_{PT}} |Z_{TH}| \quad (B2)$$

where U_{PH} and U_{PT} are the output voltages of the hydrophone and of the reversible transducer when it is used as a receiver.

Substitution of Z_{RC} for $|Z_{TH}|$ results in the formula:

$$M_H^2 = \frac{2d}{\rho f} Z_{RC} \frac{U_{PH}}{U_{PT}} \frac{U_{TH}}{U_T} = M_0^2 \frac{U_{PH}}{U_{PT}} \frac{U_{TH}}{U_T} \quad (B3)$$

Here the factor $M_0^2 = \frac{4\pi d R_1 R_2 C}{\rho}$ has the dimension of sensitivity squared. It does not depend on frequency and may be chosen for a given measuring circuit as a constant value which is determined by the system of units used and by the scale factor of the measuring device (attenuator). The voltage ratios $\frac{U_{PH}}{U_{PT}}$ and $\frac{U_{TH}}{U_T}$ may also be introduced in the circuit as transmission factors of voltage dividers.

The calibration procedure

The calibration process comprises three steps. Two voltages are equalized on the level indicator in each step. This results in the equality of transmission factors of the corresponding circuits.

In the first step according to the diagram in Figure 9, page 75, the output voltage U_{PH} of the calibrated hydrophone and U_{PT} of the reversible transducer used as a receiver are compared, and the ratio $\frac{U_{PH}}{U_{PT}}$ is fixed through the transmission factor Y_1 of the potentiometer D_1 :

$$K_1 U_{PH} = Y_1 U_{PT} \quad \frac{U_{PH}}{U_{PT}} = \frac{Y_1}{K_1} \quad (B4)$$

K_1 is the transmission factor of the precision divider which is used if $U_{PH} > U_{PT}$.

In the second step, according to the diagram in Figure 10, page 75 (see also Figure 8), the voltage ratio $\frac{U_{TH}}{U_T}$ is fixed through the transmission factor Y_2 of the potentiometer D_2 . As in the first step, this is achieved by equalization of hydrophone output voltage and the output voltage of the potentiometer D_2 .

$$U_{TH} = Y_2 U_T \quad \frac{U_{TH}}{U_T} = Y_2 \quad (B5)$$